Zur Entstehung

der

Cyklonen und Anticyklonen.

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der

K. B. Ludwig-Maximilians-Universität in München

vorgelegt von

Rechtspraktikant Emil Schneider.

Regensburg.
Nationale Verlagsanstalt Buch- u. Kunstdruckerei A.-G.
1895.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546008_0138

Zur Entstehung

der

Cyklonen und Anticyklonen.

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der

K. B. Ludwig-Maximilians-Universität in München

vorgelegt von

Rechtspraktikant **Emil Schneider.**

Regensburg.
Nationale Verlagsanstalt Buch- u. Kunstdruckerei A.-G.
1895.

Nationale Verlagsanstalt, Buch- u. Kunstdruckerei A.-G. Regensburg.

Vorwort.

Wenn ich vorliegende Abhandlung der Öffentlichkeit übergebe, so möchte ich dabei Anlass nehmen, meinem hochverehrten Lehrer und väterlichen Freund, Herrn kgl. Lycealprofessor Dr. Wittwer, welcher mein Interesse an den Naturwissenschaften zu erwecken und zu unterhalten wusste und welcher auch die Anregung zur Entstehung gegenwärtiger Abhandlung gab und mich dabei unterstützte, für sein herzliches Entgegenkommen und den unermüdlichen Anteil, den er an meiner wissenschaftlichen Ausbildung genommen hat, meinen innigsten Dank auszusprechen.

Eine wesentliche Unterstützung zur Vollendung dieser Broschüre fand ich auch durch Herrn geheimen Admiralitätsrat von Neumeyer, welcher mir in liebenswürdigster Weise die Wetterkarten der deutschen Seewarte zur Verfügung stellte und welchen ich hierfür meines herzlichsten Dankes versichere.

Endlich möchte ich an dieser Stelle nicht versäumen, der freundlichen Beihilfe des Herrn Hofphotographen Schmidbauer in Regensburg bei der Vervielfältigung der im Anhang beigegebenen Wetterkarten dankbarst zu gedenken.

Regensburg, im Dezember 1894.

Der Verfasser.

Inhalt.

Seite

Vorwort III

Einleitung 1

I. Allgemeiner Teil 4
1. Saug- und Druckwinde . . . . . —
2. Luft- und Wasserströmungen 8
3. Beobachtungen an fliessendem Wasser . . . 9
4. Experimentelle Wirbelbildung 11
5. Zusammenstoss zweier Winde 18
6. Zusammenhang zwischen Luftdruck und Wind . 20

II. Die Anticyklonen 24
1. Herrschende Theorie . . . . . —
2. Stauung 35
3. Kontraktion 38

III. Die barometrischen Minima 42
A. Depressionsfurchen . . . . . —
1. Begriff . . . . . —
2. Entstehungsursache 44
B. Die eigentlichen Cyklonen 50
1. Die physikalische Theorie . . . . . —
2. Die mechanische Theorie 56
3. Wirkung des Zusammenstosses von Luftströmen und Wirbelbildung 58
4. Nachweis der Cyklonenentstehung infolge Zusammenstoss von Winden durch die synoptischen Karten 63
5. Luftbewegung im Innern des Wirbels . . . 75
6. Intensität der Cyklonen 77
7. Äussere Form der Cyklonen 80

Seite

8. Deformationen der Cyklonen und Teilminima . 80
9. Erlöschen der Cyklonen 82
10. Das Buys-Ballotsche Gesetz 83
11. Das Cl. Ley-Hildebrandssonsche Schema der Cirrusbewegung 86
12. Temperatur der Cyklonen 88
13. Örtliche Lage der Cyklone zur Anticyklone . 89
14. Niederschlag und Bewölkung . . . . . —
15. Fortpflanzung der Cyklonen 95

Literatur und Bemerkungen 106

Anhang: Hilfstafel und Wetterkarten Tafel I bis XII.

Einleitung.

Als die theoretisch und vor allem praktisch wichtigsten Phänomene in der Meteorologie werden die Cyklonen und Anticyklonen und ihre Veränderungen betrachtet und dieser Umstand veranlasste eine grosse Zahl von Theorien zur Erklärung jener Witterungszustände. Hann[1]) teilt die Theorien in zwei Hauptarten: Die physikalische und die mechanische.

Erstere lässt durch anormale Erwärmung eines Gebietes einen aufsteigenden Luftstrom sich entwickeln, der seinerseits eine Neigung der Isobarenflächen gegen dieses Gebiet hervorruft und so eine Luftbewegung i. e. Wind einleitet, der durch die Erdrotation abgelenkt, jene bekannten spiralförmigen Bahnen gegen das Centrum der Cyklone beschreibt. Zur Erhaltung der aufsteigenden Tendenz und mit ihr der Druckerniedrigung wird die bei der Kondensation des mitgeführten Wasserdampfes freiwerdende latente Wärme benützt.[2])

Die mechanische Theorie dagegen lässt die Cyklone nach Art der Wasserwirbel durch den Zusammenstoss von Luftströmen entstehen; die durch die Rotation der Luft-

massen auftretende Fliehkraft gilt als Ursache des niederen Luftdruckes in der Mitte des Wirbels.

Der Vollständigkeit halber wäre noch eine dritte Gruppe von Theorien zu erwähnen, welche die atmosphärische Elektricität als Ursache der Luftwirbel ansieht. Doch wird sie gegenwärtig nur mehr selten verteidigt, während von den beiden zuerst genannten die physikalische zur Zeit das Übergewicht hat. Es fehlt übrigens auch letzterer nicht an Gegnern, die gegen sie Bedenken erheben. Von diesen Gegnern hebe ich besonders Faye[3]) und Andries[4]) hervor, die sie mit ziemlicher Geringschätzung behandeln und sie durch die mechanische Theorie ersetzen. So sagt z. B. Faye: „Die Meteorologen haben sich mit ihrer Phantasie eine Atmosphäre aufgebaut, die keine Ähnlichkeit mit der wirklichen hat;" es ist hohe Zeit, auf die grossen aufsteigenden Ströme zu verzichten" etc. In neuester Zeit scheint auch Hann[5]) die physikalische Theorie nicht mehr in dem Masse wie früher zu vertreten.

Doch muss zugegeben werden, dass nicht alle Vorwürfe begründet sind und die Grundlage der mechanischen Theorie selbst einer Stütze bedarf. So sagt Andries:[6]) „Zur Erklärung der Entstehungsweise der Cyklone nehme ich in der Höhe der Atmosphäre heftige Luftströmungen an . . . Es ist überflüssig, das Vorhandensein derselben nachzuweisen." Von den Vertretern der physikalischen Theorie wird dagegen mit Recht betont, dass jene dort verlangten Luftströmungen nur durch ihre Theorie erklärt werden, und somit die mechanische Theorie zuvörderst der physikalischen Theorie als Ausgangspunkt bedürfe.

Die physikalische Theorie allein giebt bis jetzt eine Erklärung sowohl der allgemeinen als der cyklonalen Luftbewegung. Eine Änderung des Luftdruckes, hervorgerufen durch einen aufsteigenden Luftstrom, muss ihr zufolge vorausgehen, damit sich überhaupt ein Wind einleite. Soll also nach der mechanischen Theorie eine Cyklone

durch das Zusammentreffen von Winden entstehen, so muss man stillschweigend bereits ein barometrisches Minimum i. e. eine Cyklone an jenem Konfliktpunkte voraussetzen, weil sonst dort überhaupt keine Luftströme hinkämen, also auch nicht zusammenstossen könnten. Im Grunde wäre also die Cyklone, für den Fall, dass die jetzige Anschauung über Luftdruck und Windentstehung richtig ist, bereits vorhanden, ehe sie durch den Konflikt der Winde entstehen könnte.

Soll also die mechanische Theorie nicht jede Berechtigung verlieren, so müssten zunächst ihre Grundlagen: die Entstehung der Winde und die Möglichkeit eines Zusammenstosses unabhängig von der physikalischen Theorie bewiesen werden.

I.

Allgemeiner Teil.

1. Saug- und Druckwinde.

Nehmen wir zunächst die Entstehung des Windes, wie ihn die physikalische Theorie[7]) giebt, an: Die über einem Gebiet, das stärker erwärmt ist, als das umliegende, aufsteigende Luft fliesst oben seitwärts ab; dadurch bildet sich unten ein Gradient gegen dieses Gebiet und die umliegende Luft wird sich nach dem wärmeren Orte hin in Bewegung setzen. Der Wind verdankt somit der durch die Erwärmung geschaffenen Druckverminderung seine Entstehung, er wird von dem Ort grösster Druckerniedrigung oder was hier dasselbe sagt, grösster Erwärmung gleichsam angesaugt. Um den Kreislauf des Windes vollständig zu machen, nimmt die physikalische Theorie an, dass die oben seitlich abgeflossene Luft an kälteren Orten wieder herabsinke und unten vom neuen zuströme. Das experimentelle Beispiel für diese Art der Luftcirkulation ist ein Zimmer, in dem sich ein geheizter Ofen befindet; wir finden hier dieselbe Saugwirkung des Ofens, wie oben die des barometrischen Minimums und eine passende Bezeichnung dieser Art der Windentstehung wird durch Saugwind gegeben sein. Solange nicht durch Erwärmung eine Ausdehnung der Luft und da-

mit ein **Gradient** sich bildet, tritt keine Bewegung der unteren Luftschichten ein. Diese Anschauung treffen wir bei allen Vertretern der physikalischen Theorie. Immer ist der Wind **sekundär** hervorgerufen von einem durch Erwärmung eingetretenen Barometerminimum, was somit die primäre Entstehung des Minimums (Cyklone) durch Winde geradezu ausschliesst.

So findet sich z. B. in dem Referat [8]) über „Entstehung der Cyklonen in der Bai von Bengalen" von Elliot folgende Stelle: „Der feuchte SW und die starken Niederschläge im südlichen Teil der Bai . . . etc., sind daher nicht die wahre erste Ursache der Entstehung der lokalen Depression, sondern selbst erst die natürliche Folge der oben geschilderten Verhältnisse."

Einer ähnlichen Ansicht begegnen wir in einer Abhandlung Cl. Ley's.[9]) Die grössere Einwärtsneigung der SE Winde wird da nämlich so erklärt, dass die Ablenkung ganz fehlen müsse, dort wo der Luftstrom beginnt, sie werde um so kleiner sein, je kürzer der zurückgelegte Weg sei.

Die physikalische Theorie und somit die herrschende Ansicht kennt nur diesen Saugwind, wie er eben erläutert wurde.

Eine einfache Betrachtung der Natur aber giebt uns noch eine zweite Art, wie ein Wind entstehen kann. Ersetzt man im obigen Beispiel jenen Ofen in einem Zimmer durch einen Eisblock, so leitet sich ebenfalls eine Cirkulation der Luft ein, indem die kalte Luft infolge Druckwirkung vom Eis weg und in die nebenbefindliche wärmere hineinströmt und diese zur Seite drückt. Wir wollen diese Art des Windes zum Unterschiede von der vorbesprochenen Druckwind nennen. Man darf durchaus nicht etwa glauben, dass dieser Druckwind identisch sei mit dem von oben absteigenden und unten der Cyklone horizontal zuströmenden Wind, wie ihn die physikalische Theorie kennt; denn dort muss zuerst eine Druckernie-

drigung durch Wärme eintreten und hierdurch wird die Luft angesaugt, während hier keine Druckerniedrigung an einem anderen Orte vorhergehen muss, sondern die durch die Kälte specifisch schwerer gewordene Luft fliesst in die daneben befindliche und erhöht sogar dadurch den dortigen Luftdruck. Es muss also nicht zuerst Luft weggeschafft, oder mit anderen Worten eine barometrische Depression geschaffen sein, damit ein Wind sich einleiten kann, sondern lediglich die Druckwirkung der Kälte schafft jenen Wind unbekümmert um die rings bestehende Luftdruckverteilung, die nur in zweiter Linie als verstärkend oder störend in Betracht kommen kann.

Der Druckwind ist nicht etwa eine dem Saugwind gegenüber sekundäre Erscheinung, sondern ebensogut als dieser primär und demselben gleichberechtigt. Wenn man einen Eisklotz in ein Zimmer bringt, so entsteht ohne alle Erwärmung, also ohne alle Saugwirkung, eine Strömung von dem Eisblocke weg, ein Druckwind. Dieser Druckwind findet sich ebenso wie der Saugwind in der Natur und hat wie dieser seine Konsequenzen, welche von einer Theorie, die wie die physikalische keinen Druckwind kennt, nur durch mehr oder minder gewagte Hypothesen erklärt werden können.

Die Chemie lässt sehr gute Analoga der Druckwinde beobachten, wenn man Joddämpfe oder Kohlensäure in ein mit atmosphärischer Luft gefülltes Gefäss giesst: die Luft wird allmählich zur Seite geschoben und es vollzieht sich langsam eine Druckströmung. Ähnlich verhält es sich, wenn Syrup in ein Gefäss mit Wasser gegossen wird.

Im Freien lässt sich dieser Druckwind in den Gebirgen beobachten. Man trifft dort morgens einen Wind, der thalwärts strömt und empfindlich kalt ist. Dieser absteigende Wind drängt die unten befindliche wärmere Luft beiseite.

Den Bergwind als Saugwind zu erklären, wie das häufig geschieht, ist falsch; denn er verdankt lediglich der starken Abkühlung der Bergabhänge seinen Ursprung, wie

sich daraus ergiebt, dass er bereits abends eintritt und bis Sonnenaufgang dauert, also gerade zu der Zeit, wo zur Entstehung eines aufsteigenden Stromes über dem Thal absolut keine Veranlassung gegeben ist, weshalb der Bergwind nicht einer Saugwirkung, sondern der durch Kälte bedingten Druckwirkung seine Entstehung verdankt.[10]) Am Tage erwärmt sich die Luft zunächst dem Gebirge mehr, als die Luft in gleicher Höhe fern von demselben. Die Luft über dem Gebirge als die wärmere steigt in die Höhe, die äussere Luft strömt nach und wir haben hier einen Saugwind.

Denselben Druckwind findet man aber auch in der Ebene und zwar als mächtigen Windstrom, nur dass bis jetzt jeder Luftstrom als Saugstrom angesehen wurde. Es ist dies vor allem der in unseren Gegenden bekannte Nordostwind, mit dem wir es so oft zu thun haben.

Abkühlung eines grösseren Gebietes bedingt die Entstehung des Druckwindes. Mühry[11]) bezeichnet sehr treffend den asiatischen Kältepol als Windpol; infolge der Druckwirkung, nicht aber wegen der Saugwirkung irgend einer entfernten sporadischen Cyklone gehen die Winde dort weg. Druckwinde ändern sich deshalb auch nicht mit dem Fortziehen einer zuällig in der Nähe sich befindlichen Cyklone.

Dieser principielle Unterschied von Druck- und Saugwind kann nicht genug betont werden; doch kann es auch vorkommen, dass eine gegebene Luftströmung an der einen Strecke ihrer Bahn mehr einer Saugwirkung, an der anderen mehr einer Druckwirkung zuzuschreiben ist, so dass die Grenze, wo die eine anfängt, die andere aufhört, so schwer festzustellen ist, wie bei einem Ring. So wird die allgemeine Luftcirkulation gegen den Äquator zu als Passat ein Saugwind, der von den Polen kommende Wind jedoch ein Druckwind sein, der dann in niederen Breiten unmerklich in den Saugwind übergeht.

2. Luft- und Wasserströmungen.

In der Physik gilt als Fundamentalsatz, dass Flüssigkeiten und Gase sich analog verhalten. Setzt man in einer mathematischen Formel, die für Flüssigkeiten gilt, statt der „Niveauhöhe" h, die „Dichtigkeit" s, so ist die Formel für Gase anwendbar.

Diese physikalische Thatsache wird von Fachmeteorologen öfter ausser acht gelassen und die Luft soll ganz anderen Gesetzen folgen, als die Flüssigkeit. Nichtsdestoweniger finden wir in jenen meteorologischen Arbeiten, die die Analogie von Luft und Wasser zu Grunde legen, eine so grosse Übereinstimmung mit den Beobachtungen, wie sie mit den anderen Erklärungen nicht erreicht wird. So wendet Colding[12]) die hydrodynamischen Gleichungen mit grossem Erfolge auf atmosphärische Cirkulation an, ebenso Oberbeck[13]) in seiner Abhandlung „Über die Bewegungen der Luft an der Erdoberfläche". Andries[14]) geht in seiner Theorie ebenfalls von jener Analogie aus, und vor allem hat Helmholtz[15]) in seinen verschiedenen Arbeiten über atmosphärische Erscheinungen die hydrodynamischen Gleichungen mit bestem Erfolge durchgeführt; ihm schloss sich Boltzmann[16]) in seinen Vorlesungen über Hydrodynamik mit gleichem Resultate an. Auch Sprung[17]) geht in seinem Lehrbuche der Meteorologie von den hydrodynamischen Gleichungen aus und findet Übereinstimmung mit den Beobachtungen.

Angesichts dieser Thatsachen wird eine Theorie der Cyklonen, die sich auf analoge Erscheinungen beim Wasser stützt, nicht ganz ohne Aussicht auf Erfolg sein; man darf nur die Analogie nicht zu weit treiben und vor allem der grösseren Elasticität der Luft und ihres geringeren Reibungskoeffizienten gedenken und endlich auf ihre variable Dichte Rücksicht nehmen.

3. Beobachtungen an fliessendem Wasser.

Wir treffen in unserer Atmosphäre geradlinige Strömungen und Wirbel an; das Gleiche zeigt ein grösserer Wasserstrom.

Zu meinen Beobachtungen habe ich die Donau bei Regensburg benützt und zwar die Strecke ober- und unterhalb der steinernen Brücke. Die Donau hat hier ein starkes Gefälle, die Ufer sind teils senkrecht, teils unter dem Böschungswinkel gemauert; der Flussgrund ziemlich eben und meist mit Kies bedeckt.

Die Oberfläche dieses Stromes zeigt durchaus keine regelmässige Gestalt, wir finden keine gleichheitlich fliessende ebene Wassermasse. Nicht nur, dass durch die Brückenpfeiler verschieden gerichtete Strömungen hervorgerufen werden, auch an denjenigen Strecken, wo keine mechanischen Hindernisse vorhanden sind, lassen sich solche verschiedene Strömungen erkennen. Diese einzelnen grösseren Strömungen verfolgen im grossen und ganzen die Hauptrichtung des Stromes, wobei aber die eine Strömung oft schneller fliesst, als die nebenliegende, ja unterhalb der Brücke finden wir rückfliessende Strömungen, und zwar noch in beträchtlicher Entfernung von den Pfeilern. Ausser diesen grossen Strömungen finden sich unendlich viele kleinere transversale, welche oft weit in die Mitte des Strombettes hineinreichen, ohne merklich von ihrer Richtung abgelenkt zu werden, bis sie endlich der vorwiegenden Stromrichtung folgen.

Durch diese Strömungen werden die verschiedenartigsten Gebilde hervorgerufen. Man sieht langgestreckte, breitere und schmälere Wasserberge, deren Rücken bedeutend über dem mittleren Niveau liegen. Sie entstehen, wenn sich zwei Strömungen diametral begegnen, oder auch, wenn zwei vom Ufer reflektierte Wellen, oder entgegengesetzte Transversalströmungen zusammentreffen.

Die umgekehrte Erscheinung, nämlich langgestreckte furchenähnliche Gebilde, die gegen die Enden schmäler werden, treffen wir einmal zwischen zwei ziemlich gleichgerichteten aber mit verschiedener Geschwindigkeit fliessenden Strömungen und ganz besonders in dem Zwischenraume, wo eine rückläufige Strömung einer ordentlichen Strömung begegnet; diese Furchen sind nicht sehr tief, erhalten sich aber sehr lange an derselben Stelle und bilden sich nach dem Verschwinden sehr oft sofort wieder neu.

Die interessantesten Erscheinungen bilden wohl die vielen kleinen und grösseren Wirbel. Sie entstehen fast regelmässig, wenn zwei Strömungen unter spitzem oder stumpfem Winkel zusammenstossen. Von diesen beiden Strömungen kann man meist einen Hauptstrom d. h. stärkeren, mächtigeren und einen Nebenstrom d h. schwächeren unterscheiden. Der Drehungssinn im Wirbel ist dann so, dass der dem Hauptstrom anliegende Teil des Wirbels tangential mit dem Hauptstrom läuft.

Grenzt ruhiges Wasser an eine Strömung, so entstehen an dieser Seite ebenfalls gern kleine Wirbelchen, die jedoch weder bedeutende Tiefe, noch lange Dauer zeigen.

Was die Fortpflanzungsrichtung der Wirbel betrifft, so erfolgt sie anfangs in der Tangente des Hauptstromes, bildet aber bald einen immer mehr zunehmenden Winkel mit ihr, um in der Resultante der beiden Ströme, welche den Wirbel hervorriefen, fortzugehen.

Die Erhaltungstendenz der Wirbel verhindert ein baldiges Erlöschen derselben, so dass sie sich oft eine ziemliche Strecke verfolgen lassen. Sehr oft werden dem Erlöschen nahe Wirbel von einer anderen Strömung erfasst, wieder vertieft und in andere Bahnen gelenkt. Trifft jedoch ein solcher Wirbel auf eine Strömung, die eine der seinigen entgegengesetzte Drehung hervorzurufen bestrebt ist, so erfolgt sein Erlöschen sehr schnell, indem eine völlige Abwickelung des Trichters stattfindet. Ebenso finden durch Hindernisse oder andere die Bahn kreuzende kleinere Strö-

mungen Deformationen der Wirbel statt, Eindrücke u. s. w.; oder es entsteht daneben ein kleinerer Trichter, der dann mit dem anderen fortgeht.

Ein hübsches Schauspiel gewähren in der Nähe des Ufers die kleinen Trichterchen, welche oft an ein Dutzend hintereinander in kurzen Abständen sich folgen, hervorgerufen durch die dort reflektierten Wellen.

Die Grösse der Wirbel ist verschieden, zwischen 10—30 cm Durchmesser an der Oberfläche. Ebenso die Tiefe; manche sind von geringem Durchmesser, dafür um so tiefer. Die Achse der Wirbel ist von unten nach oben gegen rückwärts geneigt; die rotierende Bewegung im Innern ist meist sehr bedeutend. Die Wasserteilchen bewegen sich in spiralförmigen Bahnen nach abwärts, wie eingeworfene leichte Körperchen zeigen. Am oberen Rande des Wirbels bemerkt man einen niederen Wulst, weil das durch den lufterfüllten Innenraum des Trichters verdrängte Wasser daneben wieder als leichte Erhebung zum Vorschein kommen muss.

Der Ort, an dem diese Wirbel auftauchen, ist keineswegs immer der nämliche, was beweist, dass sie durch Strömungen und nicht durch Bodenhindernisse hervorgerufen werden. Doch lässt sich eine gewisse Präponderanz einzelner Erscheinungsorte nicht verkennen. Ebenso ist die Zeit zwischen zwei Wirbelbildungen am nahezu nämlichen Orte sehr verschieden und ohne bemerkbare Periode; nicht jedesmal wird durch verschiedene Strömungen ein ausgeprägter Wirbel gebildet, sondern lediglich ein leichtes wechselndes Heben und Senken der Wasseroberfläche.

4. Experimentelle Wirbelbildung.

Zu eingehenderer Erforschung der Ursache der Wirbelbildung wollen wir die experimentelle Nachbildung derselben näher besprechen.

An erster Stelle glaube ich hier ein Experiment von Graf de Maistre[18]) hervorheben zu müssen. Ein Eingehen

ins Detail unterlasse ich und verweise auf Gehlers physikalisches Handwörterbuch,[18]) wo sich eine ausführliche Beschreibung findet; ich habe dasselbe mit gleichen Resultaten wiederholt und hebe hervor: Bringt man in ein cylindrisches hohes Gefäss Wasser und wirft eine Hand voll Kopalpulver hinein, versetzt man ferner das Wasser durch ein aus vier kleinen Brettchen gebildetes Mühlrad, welches oben ein paar Centimeter tief in das Wasser versenkt wird, in Rotation, so erhebt sich der Kopal trombenförmig, die Basis des Kegels ist am Boden, die Spitze jedoch in der Mühle. Giesst man halb Wasser, halb Öl ein, und bringt das Rädchen durch Übersetzung am Boden des Gefässes in Rotation, so steigt das Öl ins Wasser hinab und bildet so eine auf der Spitze stehende Trombe. Weitere Experimente stellte Dr. Andries[19]) an, die in seiner bereits erwähnten Abhandlung beschrieben sind, worauf ich für Näheres verweise. Die Erregung geschieht da in der Art, dass ein vertikales Brettchen in einem Gefäss voll Wasser parallel mit sich selbst horizontal rasch verschoben wird. Hinter beiden Seitenkanten des Brettchens entstehen dann kleine Wirbel.

Ich habe diesen Versuch in der Weise abgeändert, dass ich in einen kleinen Bach ein Brettchen vertikal stellte, es bildeten sich zwei Wirbel aus, deren Fortpflanzungsrichtung nahezu in einer Parabel verlief, unter welchem Winkel zur Wasserströmung auch das Brettchen stehen mochte. Die Bewegung in den Wirbeln war eine absteigende.

Auch Helmholtz[20]) bildete Wasserwirbel künstlich nach, indem er in einem unten mit einer Ausflussöffnung versehenen Gefäss Wasser in Rotation versetzte.

Direkt für luftförmige Körper hat Vettin[21]) Experimente angestellt, indem er Tabakrauch unter eine Glasglocke liess und nun die Unterlage erwärmte oder abkühlte. Eine Zusammenstellung dieser Versuche giebt Sprung[22]) in seinem Lehrbuch. Jedoch glaubt auch letzterer, dass Vettins

Versuche mehr die allgemeine Cirkulation der Atmosphäre, als die unperiodischen Erscheinungen darstellen.

Diese vorliegenden Versuche lassen einerseits wenig Modifikationen zu, andererseits rechnen sie mit in der Natur nicht vorkommenden Mitteln, wo weder die Mühle von de Maistre, noch das Brettchen Andries', noch ein Gefäss mit einem Loch unten, noch endlich eine Glasglocke da sind.

Es wäre deshalb wünschenswert, nur Strömungen zu benützen, die allein in der Natur vorhanden sind und jene Erscheinungen schaffen; wir haben ja gesehen, dass alle atmosphärischen Vorgänge auf von der Temperatur geschaffene Luftströmungen zurückzuführen sind. Zu diesem Zweck sollte man künstlich Strömungen hervorbringen und diese einander beeinflussen lassen. In der Natur lernten wir den Saug- und Druckwind als solche Strömungen kennen; da jedoch mit Gasen schwer zu experimentieren ist, so wendete ich die analogen Wasserströmungen an. Nach verschiedenen Versuchen durch künstliche Strömungen Wasserwirbel hervorzurufen, erhielt ich endlich durch folgende Anordnung befriedigende Resultate, die hier näher beschrieben werden sollen, da meines Wissens dieselben neu sein dürften.

Ich benützte eine rechteckige Blechwanne, 40 cm lang, 24 cm breit und 15 cm hoch. An den Wasserleitungshahn wurde ein Gummischlauch angeschraubt und an dessen Ende eine hohle Glasgabel angesteckt, deren Hauptrohr 9 mm, die beiden Zweige je 4 mm Durchmesser hatten. Die Gabel war nahe dem Rande der Wanne eingeklemmt und an die beiden Gabelende je ein Kautschukschlauch von ungefähr einem halben Meter Länge gesteckt. An deren Enden befand sich wiederum je ein Glasrohr, dessen Mündung froschmaulähnlich zusammengedrückt war, d. h. das 4,5 mm Durchmesser haltende Röhrchen wurde vorn zu einer Öffnung gezogen, welche 9 mm breit, dabei aber nur 0,5 mm hoch war. Öffnet man nun den Hahn, so strömen zwei flache, gleichstarke, fächerförmige Wasserstrahlen aus.

Ich benützte letztere dabei in einer Länge von 5—9 cm (von der Mündung bis zu jener Stelle gemessen, wo der flache Strahl in einen runden übergeht). Es entspricht dies einem Wasserdruck von etwa 1,0—1,5 Atmosphären. Die Breite des Strahles betrug ungefähr 12—20 mm.

Die Wanne wurde zuvor 3—4 cm hoch mit Wasser gefüllt. Ausserdem ist es zweckdienlich, einen Quetschhahn an einem von den beiden Schläuchen anzubringen, um den einen Strom nach Bedarf schwächen zu können.

Werden nun die beiden Strahlen möglichst gerade gerichtet etwas unter den Wasserspiegel in die Wanne gehalten, so hat man naturgetreue Strömungen, da auch das anliegende ruhige Wasser von den Strahlen mitgerissen wird. Durch verschiedene Richtung der beiden Strahlen kann man nun sehr viele Kombinationen ausführen, von denen die hauptsächlichsten dann angeführt werden sollen.

War die Wanne voll, so schöpfte ich sie aus, da die Anbringung einer ständigen Abflussöffnung störend auf die Bewegungsverhältnisse wirkt. Es sei gleich hier bemerkt, dass ich die zwei Strahlen unter Wasser aufeinander wirken liess und sie sich also unter verschiedenen Winkeln trafen. Dabei schwankt die Entfernung dieser Treffstelle von der Ausflussmündung der Röhrchen je nach Stärke der Strahlen zwischen 3—8 cm.

Die störenden Einflüsse der reflektierten Strömungen suchte ich durch oftes Wiederholen mit verschiedener Strahlstärke, sowie durch Änderung des Eintauchplatzes zu beseitigen. Die Experimente gelingen am schönsten gleich bei Beginn, ehe sich noch eine vollkommene Cirkulation des ganzen Wassers in der Wanne längs ihren Wänden inleitet, was immer geschieht, wenn die Strahlen längere Zeit auf das ruhige Wasser einwirken. Zur Abkürzung bezeichne ich im folgenden mit „im Sinne des einen Strahls" jene Drehung eines Wirbels, welche so erfolgt, dass der diesem Strahl anliegende Teil des Wirbels der Tangente dieses Stromes folgt, also gleiche Richtung mit dem Strahle besitzt. Die Figuren

auf Tafel I des Anhanges sub Ziffer I mögen zur Anschaulichkeit beitragen; dabei bedeutet H eine Erhöhung, T eine Vertiefung der Wasseroberfläche, die Pfeile die Richtung der Bewegung der Strahlen und des anliegenden Wassers, mehr befiederte Pfeile bedeuten einen stärkeren Strom als weniger befiederte; alles ist im Horizontaldurchschnitt gezeichnet. Folgende Kombinationen wurden ausgeführt:

1) Die zwei Strahlen 1 cm unter der Oberfläche des bereits in der Wanne vorhandenen ruhigen Wassers „horizontal", d. h. die breite Fläche parallel dem Gefässboden, diametral gegeneinander stossend, die Mündungen 4—5 cm voneinander entfernt, geben an der Treffstelle einen Wasserberg; dabei streben eingeworfene Teilchen nach auswärts (Fig. 1 a):

2) Die zwei Strahlen orizontal 1—2 cm unter Wasser in entgegengesetzter Richtung, aber so, dass dazwischen ein Streifen von 1—2 cm ruhigen Wassers bleibt: Es entstehen schöne Wirbel bis 1 cm Durchmesser, meist in Form einer Ellipse. Wird der eine Strom geschwächt, so rotieren die Wirbel im Sinne des stärkeren. Wendet man stärkere Strahlen an, so werden die Wirbel länglich und von geringer Tiefe, die grosse Achse dieser Furche ist parallel den Strahlen (Fig. 1 b).

Bei dieser Anordnung erhielt ich auch ein paarmal zwei kleinere Wirbel nebeneinander, beide im gleichen Sinne rotierend, und ausserdem noch im selben Sinne um einen gemeinsamen Schwerpunkt sich drehend.[23])

Die Fortpflanzung der Wirbel geschah immer sehr langsam und bei ungleichen Strahlen in der Richtung des stärkeren; bei gleichen bleiben sie stationär, wenn nicht die reflektierten Strömungen störend einwirken.

3) Stossen die zwei horizontalen Strahlen unter einem rechten Winkel 2 cm unter der Oberfläche des Wassers zusammen, so bekommt man Furchen in der Richtung der Resultante, oder auch flache Wirbel. Fortpflanzung ebenfalls in der Resultante (Fig. 1 c).

4) Die Strahlen horizontal unter sehr spitzem Winkel zusammenstossend, ergeben eine schmale Erhöhung in der Richtung der Resultante. Dabei hängt die Höhe des Rückens von der Strahlstärke ab.

5) Die zwei horizontalen Strahlen diametral entgegengesetzt, jedoch der eine 1 cm, der andere $1^1/_2$ cm unter Wasser, geben ab und zu sehr kleine Wirbelchen, deren Fortpflanzung in der Richtung des oberen Stromes geschieht.

6) Dreht man die eine Ausflussöffnung um 90^0, so dass der Spalt vertikal steht, so erhält man einen entsprechenden Strahl, den wir einen „vertikalen" nennen wollen und der in den Figuren schmäler gezeichnet ist.

Stösst in einen horizontalen Strahl ein diametral entgegengerichteter vertikaler, so entstehen stationäre Wirbel, wobei die Drehung im Sinne des vertikalen Strahles erfolgt (Fig. 1 d).

7) Stösst ein vertikaler Strahl rechtwinkelig auf einen horizontalen, so entstehen Wirbelchen. Dabei bemerke ich, dass diese Wirbel, wie überhaupt alle angeführten Erscheinungen, immer an dem Orte sich befinden, wo der Nebenwinkel desjenigen Winkels sich befindet, unter dem die Strahlen zusammenstossen, also nie zwischen den beiden Strahlen (Fig. 1 e).

8) Stossen zwei diametral entgegengerichtete vertikale Strahlen aufeinander, so entsteht über der Treffstelle ein schmaler Wasserberg, dessen grosse horizontale Achse fast senkrecht zu der Strahlrichtung steht (Fig. 1 f).

9) Die zwei vertikalen Ströme parallel aber mit entgegengesetzter Richtung, und so dass zwischen ihnen ein 2—3 cm breiter Streifen ruhigen Wassers ist, giebt in diesem Zwischenraum an der Stelle, wo die grösste Kraft des Strahles ist, meist furchenähnliche Gebilde, deren grosse Achse parallel den Strömen ist. Dasselbe erhält man auch, wenn beide Ströme gleichgerichtet, aber von verschiedener Geschwindigkeit sind (Fig. 1 g).

10) Wird in dem sub 9 angeführten Versuch durch Anwendung des Quetschhahnes ein Strahl geschwächt, so entstehen bei einer Tiefe von $^1/_2$ cm der oberen Kante des Strahles unter dem Wasserspiegel Furchen, bei tieferem Eintauchen Wirbel, die im Sinne des stärkeren rotieren. Sie bleiben gern stationär und gehen nur langsam in der Richtung des stärkeren Strahles weiter.

11) Die zwei vertikalen Strahlen unter sehr spitzem Winkel zusammentreffend, geben bei starken Strömen eine Vertiefung an der Treffstelle und dahinter eine Erhöhung; die Fortpflanzung der ersteren geschieht wellenartig.

12) Werden die beiden Strahlen ziemlich nahe den beiden Mündungen unter rechtem oder nicht zu spitzem Winkel zusammengebracht, so entstehen intensive Wirbel (Fig. 1 h).

Bei ungleichen Strahlen erfolgt die Rotation im Sinne des stärkeren, die Fortpflanzung annähernd in der Resultante, mit Neigung gegen den stärkeren Strahl.

Lässt man zwei horizontale Ströme so unter dem Wasser zusammenstossen, dass sie beide mit der Oberfläche des Wassers je einen Winkel von etwa 45^0 bilden, so entstehen grössere Wirbel, deren Entstehung durch eingeworfene leichte Teilchen genau als von unten beginnend beobachtet werden kann.

Im allgemeinen ist noch zu bemerken, dass die Bewegung im Wirbel selbst eine spiralförmig absteigende war, ausserhalb der Trichterwände jedoch oft ein Aufsteigen beobachtet werden kann. Befanden sich die Wirbel nur in geringer Höhe über dem Gefässboden, so konnte man ein spiralförmiges Ansaugen von am Boden liegenden eingeworfenen leichten Körperchen beobachten. Die Entstehung der Wirbel etc. erfolgt nicht sofort nach dem Einführen der Strahlen, sondern einige Sekunden später.

Noch ist die wechselnde Tiefe der Wirbel interessant; der tiefste Punkt befand sich immer in einer auf- und abgehenden Oscillation.

Auch eine Auffrischung von beinahe erloschenen Wirbeln durch neue Strömungen war bemerkbar.

Es gelingen die Experimente am schönsten, solange das Wasser in der Wanne die Tiefe von 6—8 cm nicht überschreitet. Für die Bestimmung der Fortpflanzung eignen sich die ersten Wirbel, welche nach dem Eintauchen entstehen, am besten, weil da die Reflexion der Strahlen an den Gefässwänden noch wenig ablenkend einwirkt.

5. Zusammenstoss zweier Winde.

Fassen wir die Ergebnisse der Naturbeobachtung und der Experimente zusammen, so sind wir versucht, ähnliche Entstehungsursachen auch für die Cyklonen anzunehmen.

Die erste Frage wird dann die sein, ob verschieden gerichtete Winde zusammenstossen können. Von den Vertretern der physikalischen Theorie wird ein Zusammenstoss verschieden gerichteter Windströme als unmöglich hingestellt und damit die mechanische Theorie gänzlich verworfen. Diese Folgerung ergiebt sich allerdings mit Notwendigkeit aus der einseitigen Annahme der physikalischen Theorie, dass nur der Saugwind da sei; sobald man aber Saugwind und Druckwind als zwei gleichberechtigte unabhängige Windsysteme kennen gelernt hat, wie wir dies oben ausführten, ist ein Zusammenstoss von Winden nicht nur möglich, sondern sogar notwendig. Nehmen wir z. B. an, es stossen zwei Gebirgsthäler unter einem spitzen Winkel zusammen, so müssen doch auch die aus ihnen kommenden Druckwinde an der Ausmündungsstelle in Kollision geraten. Ebenso können aber auch zwei andere Druckwinde, die von verschiedenen Kältecentren wegwehen, auf ihrem weiteren Weg zusammenstossen. Endlich kann ein Druckwind in einen Saugwind einfallen, sei es, dass dieser Druckwind aus einem Thale kommt, während senkrecht zur Thalmündung ein Saugwind weht, der z. B. durch eine benachbarte Cyklone hervorgerufen ist, oder sei

es, dass der Druckwind von einem Kältecentrum wegweht und dabei in das Windsystem einer Cyklone gedrückt wird. Es können also entweder zwei Druckwinde oder ein Druckwind und ein Saugwind, nie aber zwei Saugwinde in Kollision kommen.

Wie hat man sich den Zusammenstoss zweier Winde zu denken?

Wie zwei Billardkugeln stossen die Winde natürlich nicht zusammen, sondern analog einer Flüssigkeit drängt der stärkere Luftstrom den schwächeren zur Seite, wobei die angrenzenden Luftschichten ineinander übergehen und das Resultat ist, dass beide Ströme umgekehrt proportional ihrer Stärke von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt werden. Es wird oft eingewendet, dass zwei Winde nicht zusammenstossen, sondern sich ausweichen. Das ist aber doch wohl nur bei mit Instinkt begabten Wesen der Fall, andere durch Naturkräfte in Bewegung versetzte Körper weichen sich nur infolge eines vorangehenden Zusammenstosses aus.

So auch bei zwei Winden: die Grenzteilchen stossen zusammen, werden dadurch komprimiert und zwingen so die nebenliegenden aus ihrer anfänglichen Lage. Je näher die Stromteilchen der Treffstelle liegen, desto mehr werden sie aus ihrer ursprünglichen Geschwindigkeitsrichtung und gegenseitigen Lage abgelenkt.

Eine anschauliche Darstellung, wie Winde zusammenstossen, giebt die bekannte Theorie von Dove[24]) und dann die Darstellung der Umbiegung der Cyklonenbahnen von Lommel,[25]) wo auch der in das cyklonale Windsystem eindringende Passatwind die Änderung der Bewegungsrichtung der Cyklone hervorbringt.

Der Einwand, dass Luftströme wegen ihrer Kompressibilität nicht wie verschieden gerichtete Flüssigkeitsströme zusammenstossen, ist, abgesehen von der nachgewiesenen Analogie zwischen Gasen und Flüssigkeiten, schon deshalb nicht stichhaltig, weil das Luftmeer nicht durch feste Wände

eingeschlossen ist. Infolgedessen kann die Kompression des einen Luftstromes nur so weit gedeihen, bis die Spannung imstande ist, die nebenliegenden Teilchen wegzudrängen und so die Bewegung der übrigen Luft mitzuteilen. Diese geringe Kompression und die immer sich vollziehende Ausgleichung derselben in der im Verhältnisse unbegrenzten umgebenden Luft berechtigt uns eben, den Zusammenstoss der Luftströme analog zu behandeln, wie den der Flüssigkeitsströme.

6. Zusammenhang zwischen Luftdruck und Wind.

Die Einführung zweier verschiedener Windarten und die im nachfolgenden Teile zu schildernde gegenseitige Einwirkung derselben aufeinander machen zur besseren Übersicht zunächst einige Bemerkungen über das Verhältnis zwischen Luftdruck und Wind überhaupt notwendig.

Die herrschende Ansicht setzt die Luftdruckänderung durch Temperaturunterschiede bedingt als primär voraus und der Wind ist erst eine Folge dieser Änderungen, er passt sich den entstehenden Gradienten an.

Die Beobachtungen an der Donau, analog auf die Luft angewendet, werden auch hier ähnliche Beziehungen zeigen müssen, wie sie zwischen Gefälle und Strömung bestehen: Das Gefälle giebt allerdings den Anlass zur Bewegung der Wassermassen, aber für die einzelnen Strömungsverhältnisse ist es nicht allein massgebend, denn wäre das Gefälle allein vorhanden, so müsste (Windstille angenommen) die Oberfläche eines Stromes eine ebene Fläche zeigen. Nun fanden wir aber, dass die Oberfläche eines rasch fliessenden Stromes keineswegs dieses einförmige Bild zeigt, sondern verschieden gerichtete, sogar oft rückläufige kleinere Strömungen, sodann ausser Wirbeltrichtern, Furchen und grösseren Erhöhungen, eine Unmasse von kleinen rinnenförmigen Vertiefungen und langgestreckten Wasserrücken daneben.

Dieses alles kann nicht die Schwerkraft bezw. das Gefälle hervorrufen, sondern ein zweiter Faktor muss diese Erscheinungen verursachen. Es ist, wie wir bereits sahen, die gegenseitige Einwirkung der durch das Gefälle geschaffenen grösseren Strömungen aufeinander, welche der Oberfläche dieses wechselförmige Aussehen verleiht. Die Strömungen stören einander in ihrem regelmässigen Lauf, dazu kommen noch die durch Reflexion am Ufer hervorgerufenen transversalen Strömungen, welche ebenfalls eine dem Gefälle widersprechende Oberflächengestaltung hervorrufen. Diesen Erhöhungen und Vertiefungen der Wasseroberflächen, deren sekundäre, also nicht durch das Gefälle hervorgerufene Entstehung auch daraus erhellt, dass an gleicher Stelle nicht immer dieselbe Erscheinung sich wiederholt, muss nun auch ein verschiedener hydrostatischer Druck längs einer senkrecht zur Stromrichtung gestellten Vertikalebene entsprechen, d. h. gleichen Abständen vom Flussgrund — diesen als eben vorausgesetzt — entspricht nicht im ganzen Querschnitt gleicher Druck, wie ihn das Gefälle verlangen würde, sondern da, wo eben die Vertiefungen sind, muss auch unten ein geringerer Druck zum Vorschein kommen, umgekehrt bei den Erhöhungen der Wasserfläche.

Würde man diese verschiedenen, auf den Flussgrund reduzierten hydrostatischen Drucke einer Strecke eines Flusslaufes auf einer Karte auftragen, so bekäme man ähnliche Isobarenkurven, wie unsere auf Meeresspiegel reduzierten Wetterkarten enthalten.

Die gleichen Einwirkungen müssen bei der Atmosphäre sich im Abhängigkeitsverhältniss zwischen Luftdruck und Wind zeigen. Die Temperaturverteilung schafft eine allgemeine Luftdruckverteilung und bedingt das Entstehen grösserer Luftströme, sie schafft Saugwind und Druckwind. Innerhalb dieser grossen Luftströme bilden sich kleinere Strömungen, wie dies die im Winde flatternde Fahne beweist; und ebenso findet man ja auf jeder Wetterkarte grössere

Windströme, z. B. die Monsune, innerhalb derselben aber kleinere abweichende, stärkere und schwächere Winde notiert.

Diese grösseren Ströme sowohl, wie innerhalb derselben die kleineren Ströme, werden einander zu verdrängen suchen, — wie dies im vorigen Abschnitt näher dargelegt wurde, — an den Grenzen berühren sie sich; ausserdem schaffen Bodenverhältnisse hier Beschleunigung, dort Verzögerung und so ergiebt sich durch dieses Ineinanderfliessen der verschieden gerichteten Windströme eine etwas andere aërostatische Druckverteilung, als durch die blosse Temperaturverschiedenheit geschaffen werden müsste. Wir können das so ausdrücken, dass, während die durch die Wärmeverteilung geschaffenen Druckdifferenzen den Wind hervorrufen, dieser letztere selbst wieder jene erste Druckverteilung modifiziert. So ist vor allem der Druckwind nach früherem zunächst unabhängig vom herrschenden Luftdruck und er kann auch mit dem Saugwind leicht in Kollision kommen und so den Luftdruck an der Treffstelle verändern. Wir finden ja auch bei der Luft Wellen, wie sie Helmholtz[26]) in neuester Zeit in den oberen Regionen der Atmosphäre annahm. Diese sind von der jeweils herrschenden ideellen Druckverteilung unabhängig, müssen aber doch ihrerseits ein Schwanken des Luftdruckes hervorrufen. Ähnlich werden ja auch die periodischen Luftdruckschwankungen erklärt.[27]) Es ist also der Wind eine Funktion des Luftdruckes, aber auch dieser eine Funktion des ersteren. Es wurde diese gegenseitige Abhängigkeit von Luftdruck und Wind bis jetzt noch nicht näher verfolgt, Kapitän Hoffmeyer[28]) streift wohl einmal die Frage, entscheidet sich aber bloss für einfache Abhängigkeit und erst in einer der neuesten Abhandlungen von v. Bezold[29]) wird die Frage der Möglichkeit einer allenfallsigen Modifikation der Isobarengestaltung durch den Wind selbst angeregt.

Dennoch giebt es ausser dem aus der Analogie zwischen Wasser und Luft gefolgerten Beweise noch manche

Anzeichen, dass diese gegenseitige Einwirkung wirklich besteht: Starken Gradienten entsprechen nicht immer starke Winde,[30]) was anders doch sein müsste; ferner erklärt sich aus den von uns beobachteten Transversalströmungen und ihrem Einwirken die verschiedene Inklination der Winde gegen die Isobaren, wie dies Cl. Ley[31]) bekanntlich beobachtete.

Weiters müsste es sonst möglich sein, aus den Isothermen die Isobaren zu konstruieren, was jedoch ohne Windangaben nie genau möglich ist. Endlich giebt eine Abhandlung von Busin[32]) Anhaltspunkte dafür, dass die Winde die Isobarengestalt modifizieren, denn jeder Verwandlung eines Isobarentypus in einer anderen entspricht nach seinen Beobachtungen an denselben Orten dieselbe Windveränderung.

Diese sekundäre Entstehung resp. Modifikation des Luftdruckes durch den von letzterem hervorgerufenen Wind ist ein Hauptgesichtspunkt, von dem auch im folgenden öfter Anwendung gemacht wird.

Die vorliegenden allgemeinen Elemente bilden nun das Material, mit welchem im folgenden versucht werden soll, eine in sich abgeschlossene, wenn auch keineswegs erschöpfende Betrachtung über Entstehung von Anticyklonen und Cyklonen nebst Begleiterscheinungen anzustellen.

II.

Die Anticyklonen.

1. Herrschende Theorie.

Die Anticyklonen wurden bisher mehr als Begleiterscheinung der Cyklonen[33]) behandelt. Erst vor einigen Jahren wurden von Hann[34]) eingehendere Beobachtungen der Wetterlage in den Anticyklonen gemacht und vor allem auf die vertikale Temperaturumkehrung daselbst aufmerksam gemacht. Trotz alledem aber ist eine einwurfsfreie Theorie der Entstehungsursache noch immer nicht gewonnen. Hann[35]) zwar verwirft die Konvektionstheorie der Cyklonen als auf thermischen Ursachen beruhend und führt dafür die dynamische Ursache in den Vordergrund und will dasselbe auch für die Anticyklonen geltend machen. Doch alle diese Abhandlungen fussen zu sehr auf einzelnen Fällen und bringen neben vielen statistischen Daten doch keine vollkommene Klarheit in die Sache. So viel scheint mir aus allem hervorzugehen, dass man allgemein in den Anticyklonen absteigende Luftströme annimmt und auf diese die mechanische Wärmetheorie anwendet und das hauptsächlich, um jene Temperaturumkehrung mit der Höhe erklären zu können.

Es liegt ausserhalb des Rahmens dieser Arbeit, eine vollständige Kritik der herrschenden Theorie zu geben, um so mehr, als noch keine abgeschlossene Forschung vorliegt. Man darf nur die fortwährenden Meinungsaustausche von den Herren Hann und Hazen[36]) in der österreichischen meteorologischen Zeitschrift vergleichen, dann wird gewiss zugegeben werden, dass jene Temperaturumkehrung nicht in jedem Falle eintritt.

Um nun die Einführung einer neuen, von der jetzigen Richtung völlig abweichenden Theorie zu rechtfertigen, müssen wir die Bedenken gegen die herrschende kurz erwähnen.

Die Voraussetzung für eine Anticyklone ist bis jetzt immer ein absteigender Luftstrom. Bis vor wenig Jahren nahm man allgemein an, die Luft werde in der Cyklone hinaufgeschafft, kühle sich oben ab, falle dann vermöge des dort auswärts gerichteten Gradienten wieder herab und bilde so durch Kompression der bereits vorhandenen Luft ein Druckmaximum.[37])

Jetzt, wo Hann[38]) gegen die Cyklonen mit warmen Centren auftritt, v. Bezold[39]) den Begriff der centrierten Cyklone ohne oben auswärts gerichtete Gradienten einführt und so die physikalische Theorie keineswegs mehr die frühere Durchsichtigkeit beibehalten hat, wird einfach in einem labilen Gleichgewichtszustand der Luft der Grund der absteigenden Ströme erblickt. Durch die absteigende Bewegung der Luft erwärmt sich diese, schafft die Temperaturumkehrung und das heitere Wetter in der Anticyklone. Aus diesem absteigenden Strom wird dann alles berechnet und mit den Beobachtungen in möglichste Übereinstimmung gebracht. Gegen die Rechnung nun lässt sich natürlich nichts einwenden, und so fragt sich nur, ob die Voraussetzungen, an die sie sich anknüpft, wirklich in der Atmosphäre gegeben sind. Ehe wir die Konsequenzen also anerkennen, müssen wir die Voraussetzungen prüfen und zwar von den verschiedenen Standpunkten aus.

Die physikalische Theorie lässt die Luft in der Cyklone aufsteigen, oben kühlt sie sich ab und fällt dann in der Anticyklone herab, wobei ja zu jeder Cyklone eine Anticyklone gehört.[40])

Woher diejenigen Anticyklonen ihre Luft beziehen, welche zu Cyklonen mit absteigenden Strömen, deren Vorhandensein ja jetzt, so verpönt sie früher waren, wieder zugegeben wird,[41]) das beantwortet jene Theorie überhaupt nicht. Doch selbst für die Anticyklonen, die zu Cyklonen mit aufsteigenden Strömen gehören, dürfte sie falsch sein: die bekanntlich im Verhältnis zu der speisenden Cyklone räumlich sehr grossen Maximalgebiete[42]) können doch unmöglich genug Luft aus der Cyklone erhalten, um den absteigenden Strom zu speisen, der dann die Druckerhöhung zustande bringen soll, um so mehr, als die Cyklone rasch ihren Ort verändert, das Maximalgebiet aber tagelang stationär[43]) bleibt. Zudem giebt es grosse fast ständige Maximalgebiete, die den Kältemaximis in Asien und Nordamerika entsprechen, wo befinden sich da die speisenden Cyklonen? Diese Unzulänglichkeit wird auch von Hann[44]) und Nils Ekholm[45]) einmal angedeutet.

Die Gestalt des absteigenden Stromes und seine Geschwindigkeit bedingt die Gestalt und Grösse des Maximums: da der Gradient der Cyklone als oben nach auswärts gerichtet angenommen wird, so muss also eine Pericyklone, wie Davis[46]) sie nennt, entstehen.[47]) Gewöhnlich entsteht aber meist nur auf einer Seite der Cyklone ein Maximalgebiet;[48]) wie macht es oben die Luft, dass sie trotz ringsum bestehendem, auswärts gerichtetem Gradient bloss auf der einen Seite aus der Cyklone austritt und herabfällt; kehrt da die gegenüber austretende Luft — und austreten muss sie ja dort auch — um und fliesst über den Wirbel unbekümmert um denselben horizontal weg, um zu der anderen Seite zu gelangen und dort erst herabzufallen?

Wo der Kern des Maximums sich befindet, muss oben die grösste Abkühlung erfolgen, damit dort die Luft mit

grösserer Geschwindigkeit herabfallen kann. Nun werden aber gerade im Kern des Maximums Temperaturumkehrungen in ziemlicher Höhe noch beobachtet, also muss es doch auch von Anfang an, oder doch bald nach Eintritt des Maximums durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung auch in grösserer Höhe wärmer werden, als in der weiteren Umgebung des Maximalkernes, trotzdem soll der absteigende Strom im Centrum grössere Geschwindigkeit erlangen, also aus kälterer Höhe kommen, als am Rand; denn die Höhe, wo der Luftstrom, der von der Cyklone kommt, zu fallen beginnt, kann über dem Kern des Maximums nicht grösser sein als über dem Rand des Maximums, da die Luft von der Cyklone weg horizontal und eher nach abwärts geneigt abfliesst. Und das alles verwickelt sich noch mehr, wenn die Cyklone weiterzieht und das Maximum stationär bleibt. Zu alledem soll sogar ein Teil der aus der Cyklone austretenden Luft gleich am Vorderrand der Cyklone niederfallen.[49])

Diese Einwendungen könnten allenfalls durch neue Hypothesen, an denen bei der physikalischen Theorie kein Mangel ist, beseitigt werden; aber die Natur des absteigenden Stromes, wie er geschildert wird,[50]) scheint sehr problematisch. Die in der Cyklone aufgestiegene warme Luft kühlt sich oben ab, während sie seitlich abfliesst, wird schwerer und fällt deshalb herab: Das wäre ganz richtig, wenn vorher da oben nicht auch schon andere Luft wäre. Wie soll sich die aufgestiegene Luft unter die Temperatur jener bereits oben vorhandenen abkühlen? Im Gegenteil konsequent müsste sie mit der sonst beliebten freigewordenen Kondensationswärme, da sie ja relativ noch feucht hinaufkommt, eventuell in jener Cirrusregion sogar noch mit der freigewordenen Zustandswärme, die bereits oben vorhandene Luft noch erwärmen, kann also keinesfalls die andere durchfallen und komprimieren.[51]) Es müsste denn alle obere Luft, weil immer kälter, herabfallen, dann giebt es überall Maxima.

Es kann sehr wohl ein Kreislauf der Luft vorkommen, aber die oben aus der Cyklone hinausgeschaffte Luft kann nicht eher herabfallen, als von unten wieder eben so viel Luft weggeschafft ist; es kann die warme Luft nicht oben in die kalte hineinströmen, also auch keinesfalls den Druck erhöhen, sondern letzteren lediglich in der ursprünglichen Höhe erhalten. Der oben nach auswärts gerichtete Gradient kann keine bedeutende Grösse haben und damit nur in nächster Umgebung der Cyklone herrschen, weil die Luft, wie angenommen, in der Cyklone oben wärmer als die Umgebung ist, sonst käme sie nicht hinauf, der Gradient aber immer vom kältern Ort gegen den wärmeren sich richtet; wir können also auch nicht annehmen, dass von der Cyklone oben ein Druckwind ausströmt; die oben infolge der Fliehkraft ausströmende Luft könnte lediglich den Fehlbetrag der oberen Luft, der dadurch entsteht, dass Luft unten weggesaugt wird, ersetzen. Die Einleitung eines Druckmaximums von oben scheint in Widerspruch mit der Temperaturverteilung zu sein.

Die neuere Forschung scheint, soweit mir die ziemlich schnell erwachsenen neuesten Arbeiten bekannt sind, die Maxima zunächst unabhängig von der durch die Cyklonen hinaufgeschafften Luft lediglich als Folge eines labilen Gleichgewichtszustandes der Atmosphäre erklären zu wollen und zwar auch in dem Bestreben, durch den entsprechenden absteigenden Luftstrom die Temperaturumkehrung in der Anticyklone zu erklären. Unter Voraussetzung eines labilen Gleichgewichtszustandes werden dann in Durchführung der mechanischen Wärmetheorie jene Temperaturumkehrungen erklärt. Soweit ich die besonders von Hann[52]) zum Beweise für die absteigenden Ströme aufgezählten Barometermaxima verfolgte, so sind typische Fälle nur im Winterhalbjahr zu finden,[53]) ebenso bei den zu diesem Zwecke ausgeführten Ballonfahrten. Im Sommer, wo es doch auch Maxima giebt, konnte ich nirgends eine ausgesprochene Temperaturumkehrung finden. So zeigen z. B.

die Ballonfahrt vom 11. Juli 1892 zu München,[54]) sowie eine Beobachtung[55]) vom 13. August 1892 in den Stubaieralpen, obwohl beide im Gebiete von Maximis, keine Temperaturumkehrung. Zudem aber scheint selbst für das Winterhalbjahr die Temperaturumkehrung nicht bei jedem Maximum stattzufinden, denn Herr Hazen[56]) macht die durch Zahlen belegte Mitteilung, dass in 70 von ihm in Betracht gezogenen Fällen nur 3 innerhalb eines Zeitraumes von über 2 Jahren diese Temperaturanomalie gezeigt haben. Zudem werden bei diesen Beobachtungen meist nur die Abweichungen von der mittleren Temperatur in Betracht gezogen, so auch auf einer Tabelle von Hann[57]) in einer grundlegenden Abhandlung über den Sonnblick, wo auf 30jährige Mittel rekurriert wird. Diese Mittelbildung verwischt aber gerade die prägnantesten Fälle und zeigt die wahren Ursachen und Verhältnisse in ihrer jeweiligen Abhängigkeit nie so klar wie einzelne Beobachtungen. Überhaupt liegt hier noch keine abgeschlossene Forschung vor und will ich nur einige principielle Bedenken näher erwähnen. Die Bildung eines labilen Gleichgewichtszustandes, wie er den Rechnungen zu Grunde liegt, wird, wenn überhaupt, so gewiss im Sommer am ehesten zustande kommen, hier kann die Luft unten wärmer sein, als dieser Höhe theoretisch (d. h. wieder mit Zugrundelegung von Hypothesen) zukäme; aber da bildet sich dann ein aufsteigender, kein absteigender Strom. Was die Luft veranlassen soll, oben im Sommer überkaltet zu werden, ist mir für den Durchschnittszustand des Wetters nicht recht erklärlich. Im Winter kann sich die Luft unten überkalten, nun dann bleibt sie eben unten. Sie kann wärmer werden (im Schutze einer Nebeldecke), dann steigt sie empor, aber die Ursache einer fortdauernden Überkältung in der Höhe wüsste ich nicht, es wird sich also auch im Winter kein solcher absteigender kontinuierlicher Strom einleiten können.

Weiters ist die Flächengrösse eines Maximums sehr ausgedehnt, es müsste also über dem ganzen Gebiete, trotz

der sehr verschiedenen Bodenbeschaffenheit, wie Gebirge, Seen etc., durch abnorme Strahlungsverhältnisse über dem ganzen Gebiet ein solch labiler Gleichgewichtszustand in der Höhe sich bilden: aber derselbe muss auch noch für verschiedene Teile in verschiedener Höhe sich ausbilden; denn jedenfalls muss doch die Luft über dem späteren Kern des Maximums aus grösserer Höhe herabfallen, als in den Grenzgebieten, um so den höheren Luftdruck und die höhere Temperatur im Kern des Maximums hervorzurufen. Rings um den Kern folgen dann in relativ grosser Entfernung die niedrigeren Isobaren, dementsprechend muss auch der labile Gleichgewichtszustand in niederer Höhe anfangen und zwar ebenfalls ringförmig um den Kern gelegen, das ist doch eine sehr kühne Voraussetzung, überall gleiche Verhältnisse bei so weit auseinanderliegenden Orten anzunehmen.

Hann[18]) zwar sagt einmal, hauptsächlich in der Mitte des Maximums gäbe es den absteigenden Strom, am Ostrand bestehe keiner; woher kommt dann hier die Barometererhöhung, da ja diese nur durch Kompression der unteren Luft erklärt werden kann? Beim Fortwandern des Maximums müsste also auch dieser labile Gleichgewichtszustand sich horizontal weiterbewegen und dazu noch die Höhe wechseln, weil jetzt da, wo früher der Kern war, sich nun der Rand des vorgerückten Maximums befindet.

Doch angenommen, die Luftschichten befänden sich zu einer gegebenen Zeit in dem verlangten labilen Gleichgewichtszustand, so leitet sich also ein absteigender Luftstrom ein. Die Folge davon muss dann doch eine Ausgleichung des unnatürlichen labilen Gleichgewichtszustandes sein, es muss doch allmählich ein stabiler an seine Stelle treten, zumal die eintretende Temperaturumkehrung sogar einen aufsteigenden Strom hervorrufen muss, wenn man konsequent sein will. Es kann doch unmöglich tage- ja oft wochenlang über ziemlich denselben Gebieten trotz fortwährendem absteigenden, also Ausgleich schaffendem Strome noch immer der labile Gleichgewichtszustand sich

erhalten, das ist denn doch zu viel Beharrungsvermögen. Ist wirklich einmal einen Augenblick ein labiler Gleichgewichtszustand geschaffen, so wird die umliegende Luft sofort den Ausgleich suchen und lediglich ein leichtes Auf- und Abwogen der Luftmassen innerhalb geringer vertikaler Entfernung sattfinden, ähnlich wie das Wasser sich sofort wieder glättet, wenn sein Gleichgewicht gestört war. Diese Ausgleichung erfolgt zeitlich und räumlich verschieden und kann nie zu solch langandauernden absteigenden Strömen Anlass geben, wie es die Form der Maximalgebiete verlangen würde. Der labile Gleichgewichtszustand kann sich für grössere vertikale Erstreckung nie mit Einem Schlag ausbilden, sondern muss, sei es von oben oder unten beginnen und immer die nächsten Schichten ergreifen. Während er aber so von der Höhe zur Tiefe oder umgekehrt vordringt, ist am Ausgangspunkt längst wieder eine Ausgleichung durch die umliegende Luft erfolgt.

Bei der theoretischen Ableitung derartiger Ströme wird immer ein idealer Luftkörper vorausgesetzt,[59]) d. h. man nimmt an, es herrsche über weitem Gebiet Windstille — die es in Wahrheit ja nie giebt — und es herrsche eine bestimmte Temperaturverteilung — die in Wahrheit auch nur an einzelnen Punkten und nicht in solch grossen Gebieten gleichheitlich existiert —, dann wird ein Luftteilchen in bestimmter Höhe angenommen und seine Bewegung unter Einfluss jener idealen Umgebung berechnet. In Wirklichkeit kann doch daraus kein richtiges Resultat entstehen, wenn es auch ab und zu — aber aus anderen Ursachen — einer Beobachtung entspricht. Man kümmert sich nie weiter um die folgenden Luftteilchen, nirgends fand ich eine Deduktion, warum auch alle jenem einen nachfolgenden Teilchen, trotz jetzt bereits verändertem idealen Zustand, tagelang noch die gleiche Bewegung machen, wie jenes erste Teilchen, da letzteres ja bereits zum Ausgleich des unnatürlichen labilen Gleichgewichtszustandes durch sein Herabsinken beigetragen hat.

Der absteigende Strom soll vor allem die Temperaturumkehrung hervorbringen:

Man kann annehmen, die Temperatur steige bei dem hinunterfallenden Strom; das Hinabfallen muss aber aufhören, sowie unten Luftschichten sind, deren Temperatur derjenigen gleichkommt, welche der herabfallende Strom durch sein Herabfallen erreicht hat. Sobald beider specifische Gewichte bezw. Temperaturen gleich sind, muss der absteigende Strom zu fallen aufhören; die Endtemperatur des fallenden Stromes kann höchstens gleich derjenigen der bereits in jener Endschichte vorher vorhandenen Luft werden. Die Temperaturumkehrung müsste also bereits vorher vorhanden gewesen sein, ehe der absteigende Strom anfing; denn der konnte sie nicht hervorbringen und noch viel weniger tagelang unterhalten, da ja damit die Bedingungen für sein Fortdauern immer schlechter werden; zudem hört gegen Abend wohl die Temperaturumkehrung auf, nicht aber das Maximum und also auch der dasselbe speisende absteigende Strom!

Ja man sagt sogar, wie dies Herr Direktor Lang in München zu mir einmal äusserte, der absteigende Strom gehe bis zur Höhe, wo die Temperaturumkehr statthat, dann fliesse er horizontal weiter[60]) — weil ja keine weitere Temperaturerhöhung eintritt — wo fliesst er denn dann hin? Es ist dort schon Luft, warum lässt sich diese verdrängen?

Oder in einer Abhandlung von Erk[61]) wird angenommen, dass, während der absteigende Strom bis zu einem gewissen Punkt herabkommt, steigt ein anderer Strom von der Erdoberfläche als aufsteigender hinauf und an der Grenze? Und wie lang kann sich das erhalten? Endlich scheint mir bei diesen absteigenden Luftströmen aus dem schon oben hervorgehobenen Fehler der Annahme von Windstille bei theoretischen Ableitungen die horizontale Geschwindigkeitskomponente sehr vernachlässigt zu werden.

Aus einer Abhandlung von Trabert[62]) findet man für einen speciellen Fall der Temperaturumkehrung die ver-

tikale Geschwindigkeit des absteigenden Stromes zu 11 m pro Stunde angegeben, d. i. 0,00305 m pro Sekunde. Ähnliches wird von Pockels[63]) berechnet. Nimmt man an, es sei eine Temperaturumkehrung im Betrage von 5°, was ja noch lange nicht das Höchste ist,[64]) entstanden, so muss die Luft aus einer Höhe von ca. 500 m herabgefallen sein. — Es werden da oft noch viel grössere Höhen z. B. von Möller[65]) 2500 m zu Grunde gelegt. Um 500 m zurückzulegen, braucht ein Teilchen bei obiger Geschwindigkeit über 45 Stunden.

Die horizontale Windgeschwindigkeit in grösseren Höhen, welche mir z. B. von Pik Peak[66]) bekannt ist, beträgt im Januar, wo Temperaturumkehrungen ja meist vorkommen, ca. 11 m pro Sekunde; auf Sonnblick nach Pernter[17]) im Januar ca. 10 m pro 1 Sekunde. Berechnet man nun den horizontalen Weg, den ein Teilchen zurücklegt, bis es 500 m vertikal herabfällt, so findet man: 45 . 3600 . 11 m = 1782 Kil. oder ca. 16°, das wäre ungefähr die Strecke Palermo—Berlin. Es müsste also das Teilchen über Palermo zu sinken anfangen, bis es über Berlin eine Temperaturumkehrung von 5° zustande bringt; eine Thatsache, die im Vergleich mit der Ausdehnung der Maxima, besonders des Kernes derselben doch gewiss nicht wahrscheinlich ist. Es liege der Kern des Maximums über Berlin, so muss ein diesem Kern entsprechendes Quantum von Luftteilchen in der Umgebung von Palermo infolge eines dort bestehenden labilen Gleichgewichtszustandes sich in Bewegung setzen. Auf dem ganzen Wege zwischen Palermo bis Berlin darf aber der labile Gleichgewichtszustand der einzelnen Schichten sich nicht ändern, denn sonst kommen die unzähligen Luftteilchen nicht bis Berlin, um dort eine Temperaturumkehr zu schaffen. Trägt man noch nach, dass wir nur die günstigsten Bedingungen zu Grunde legten, und vergleicht man damit die räumliche Erstreckung des Kernes des Maximums, so dürfte es doch nicht sehr wahrscheinlich sein, dass über solchen Länderstrecken

überall gleiche Bedingungen so lange Zeit hindurch herrschen.

Aus diesen hier nur angedeuteten Gründen kann ich die Bildung fortdauernder, über grosse Gebiete sich erstreckender und bedeutende Höhe durchfallender absteigender Luftströme, wie sie die jetzige Ansicht zur Entstehung eines Maximums fordert, als mit den wirklichen bestehenden Zuständen im Luftmeer nicht in Einklang bringen. Ich glaube, es giebt viel einfachere Erklärungen, die den Beobachtungen wohl eben so gerecht werden und sich den jeweils herrschenden Witterungsfaktoren aufs engste anschliessen und sich mit ihnen ändern, ohne neue Hypothesen anzuhängen. Eine absteigende Bewegung der Luft ist gleichwohl in einzelnen Fällen möglich, aber in ganz anderer Art, und zwar entweder infolge Saugwirkung oder infolge Abkühlung.

Ersterenfalls wird Luft an einem Ort weggesaugt und anderweitig in die Höhe gehoben, wie dies hauptsächlich in der allgemeinen Luftcirkulation am Äquator der Fall ist, dann wird da, wo Luft weggesaugt wurde, ein tieferes Niveau eintreten, also muss dieses Niveau nachgefüllt werden und das geschieht durch Zuströmen von Luft von allen Seiten, also auch von der Höhe, die Luft sinkt da oben nicht nach, weil sie kälter und schwerer geworden, sondern weil ein leerer Raum entstanden ist, der wieder ausgefüllt werden muss, bringt also kein Maximalgebiet hervor. Der andere Fall ist das Nachsinken der oberen Luft, wenn sich die dem Erdboden anliegende Luft infolge Abkühlung z. B. durch Strahlung einer Schneedecke, zusammenzieht, so also geringeres Volumen einnimmt, und also die obere Luft allmählich nachsinkt und oberhalb darüber fliesst, um überall wieder gleiche Höhe herzustellen. In beiden Fällen handelt es sich also nicht um eine von oben eingeleitete absteigende fortdauernde Luftbewegung, sondern um eine von unten hervorgerufene, einmalige oder periodisch unterbrochene, mehr wellenförmige, schwan-

kende Luftbewegung, die wir mit ausfüllen oder nachsinken am treffendsten bezeichnen können. Hier kann von einer derartig andauernden Temperatursteigerung durch absteigende Ströme also auch keine Rede sein, das Luftmeer sieht eben, wie schon früher bemerkt, von oben wie eine Flussoberfläche aus, wo auch fortwährend Höhen und Tiefen sich ausgleichen.

Wenn also der hypothetische absteigende Luftstrom unserer Ansicht nach nicht die Ursache der Druckerhöhung resp. Maximabildung sein kann, so müssen wir andere Vorgänge suchen, die den Anstoss zu solchen Gebilden geben könnten.

2. Stauung.

Wir wenden die bei der Donau im früheren gefundedenen Erscheinungen analog auf die Luft an.

Wie bei jenen Vertiefungen der Wasseroberfläche entweder ringsherum oder vorherrschend an einer Seite ein Wasserberg erscheint, so wird es auch bei der Luft sein, daher erklärt sich, dass Maxima und Minima in Wechselwirkung stehen. Die Ursache, dass Luft sich neben der Cyklone häuft, haben wir wie beim Wasser in einer Stauung zu suchen. Dieser Ausdruck bezeichnet es am besten und hat ihn auch Professor v. Lommel[68]) benützt, wiewohl Hann[69]) ihn als „nicht sehr glücklich" ansieht.

Auf Grund unserer Experimente entsteht eine ausgeprägte Stauung, wenn zwei Strömungen einander entgegenwehen, wobei es nicht gerade nötig ist, dass beide Ströme in gleicher Höhe sind, es kann auch ein oberer Strom teilweise einen unteren stauen, und das kommt bei der Luft oft vor, da die oberen Winde vielfach den unteren entgegenwehen, so ist dies z. B. der Fall beim Maximum nördlich des Äquators, wo der Antipassat in den Passat fällt. Es stimmt mit dieser Erklärungsweise überein, dass der Barometerstand an der Polargrenze des Passates am

höchsten steht,[70]) also da, wo der herabkommende Antipassat staut, und dann, dass mit dem Vorrücken der nördlichen Grenze des Passates im Sommer auch der Gürtel hohen Luftdruckes sich in höhere Breiten verschiebt. Auch die Beobachtung,[71]) dass bei hohem Barometerstand der Cirruswind die entgegengesetzte Richtung des Unterwindes hat, dürfte beweisen, dass eine Stauung stattfinde.

Die Längsachse der Erhöhungen stellte sich nach Versuch Nr. 1 und 8 senkrecht zu den Strömen; damit erklärt sich die vielfach langgestreckte Gestalt der Maxima.[72]) Beim Zusammentreffen der Ströme unter spitzem Winkel stellt sie sich in die Resultante nach Versuch Nr. 4. Dass auch Ströme, welche unter spitzem Winkel zusammentreffen, sich stauen, sieht man täglich bei Flusseinmündungen, ebenso wie aus unseren Experimenten; wir werden bei der Cyklonenbildung nochmals hierauf zurückkommen.

Bei der Atmosphäre sind die Verhältnisse für eine Stauung günstig, wenn sich zwei Druckwinde begegnen, oder wenn ein Druckwind mit dem aus einem bereits vorhandenen Maximum kommenden Winde zusammentrifft, wodurch dann die Ausläufer hohen Druckes sich bilden. Die Niveau- resp. Dichtigkeitserhöhung hängt natürlich von der Stärke und Ausdehnung der Ströme ab. Durch die immer von neuem nachdringenden Luftteilchen der beiden sich stauenden Strömungen wird die Luft an der Treffstelle sowohl ihrem Volumen als ihrer Dichtigkeit nach vermehrt und so muss eine Stauung eine Barometererhöhung mit sich bringen, also ein Maximum bilden. Das oft charakteristische heitere Wetter mag seinen Ursprung darin haben, dass die beim Zusammenstoss eintretende Kompressionswärme die Wolken auflöst und dadurch im Winter infolge Ausstrahlung Anlass zur weiteren Druckerhöhung giebt, wie wir noch ausführen werden. Die Druckverteilung in der Anticyklone hat solche Ähnlichkeit mit den Wasserbergen, dass wir nur darauf hinweisen, dass hier wie dort die Erhöhungen an Ausdehnung die Depressionen an Tiefe hervorragen.

Das Windsystem der Anticyklone ergiebt die Stauung ohne Schwierigkeit, indem durch die Druckerhöhung ein Gradient nach auswärts entstehen muss, man sieht ja auch beim Wasser, dass am Boden den bildenden Strömen entgegengesetzte und wie auch bei den Anticyklonen schwächere Strömungen statthaben, die abgelagerten Sandbänke bei Flusseinmündungen sind z. B. ein Beweis dafür, abgesehen davon, dass man rückläufige Strömungen, die durch Stauung hervorgerufen werden, vielfach beobachtet.

Die Art der Entstehung einer Stauung erklärt ferner auch, warum die Maximalgebiete selten einen kleinen Kern höchsten Druckes, sondern über grosse Flächen ziemlich gleichmässig denselben Druck zeigen. Auch die Wasserberge sind keine spitzen Kegel, sondern stark abgestumpft, weil nicht wie bei den Trichtern eine Rotationskraft auftritt. Die in ihrem Lauf gehinderten Winde verlieren mit der Zeit in immer grösserer Entfernung vom ursprünglichen Konvergenzpunkt ihre Energie, während absolut kein Grund dafür besteht, warum aufsteigende Ströme über kleinen Gebieten, absteigende dagegen nur über grossen Gebieten bestehen sollten.

Ebenso erklärt die Stauung das langsamere Fortrücken der Maxima,[73]) was nur durch Verlegung des Konvergenzpunktes möglich ist und demgemäss sich eben so langsam vollzieht, wie die Stärke der zusammenstossenden Winde sich ändert. Nach der physikalischen Theorie müsste aber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Maximums mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der speisenden Cyklone übereinstimmen.

Durch Stauung mögen vor allem die Maxima im Sommer entstehen. Diese sind ja immer niedriger und weniger beständig, als jene im Winter; auch tritt bei ihnen, wie oben erwähnt, meist keine vollständige Temperaturumkehrung ein. Das alles ergiebt sich leicht, wenn wir in der Stauung die Ursachen sehen. Im Winter hin-

gegen wird in vielen Fällen entweder allein oder neben der Stauung noch eine zweite Ursache das Entstehen der grossen beständigen Barometermaxima veranlassen.

3. Kontraktion.

Barometermaxima entstehen auch durch Abkühlung der unteren Luftschichten. Die Bedingungen hierzu sind vorzüglich im Winter gegeben. Über weiten Strecken herrscht hier grosse Kälte, weit ausgedehnte Schneestrecken, starker Frost tritt ein und die Folge ist, dass sich die unteren Luftschichten verdichten. Diese Kontraktion der unteren Luft veranlasst die seitlich befindliche Luft, in der Höhe herüberzufliessen, um so das verringerte Volumen wieder auszugleichen. Dadurch muss aber jetzt auch eine Druckerhöhung unten zustande kommen. Die Kontraktion der unteren Luftschichten erklärt zugleich die sehr oft sich einfindende Nebeldecke.[74]) Die Form der Maxima, ihre Isobarengestaltung wird aufs engste mit der herrschenden Temperatur zusammenhängen, und mit Wechsel der Temperatur wechselt auch die Druckerhöhung, deshalb bleiben die Maxima so lange stationär, als die kalte Temperatur anhält.

Vergleicht man die Isobarenkarte im Winter mit den Isothermen, so findet man eine viel grössere Übereinstimmung als im Sommer, und die einzelnen Abweichungen haben ihren Grund in Störungen der allgemeinen Luftströme, wie wir dies bei Entstehung der Cyklonen nachweisen werden. Es ist ja auch bekannt, dass bei den Wintermaxima fast regelmässig Frost herrscht oder grosse Kälte.[75]) So sagt Lomis:[76]) „die Maxima zeichnen sich durch Kälte aus.“ Teisserence de Bort:[77]) „die Maxima fallen mit Vorliebe mit negativen Temperaturanomalien zusammen.“ Weitere Beweise sind der höhere Barometerstand im Winter auf der nördlichen Halbkugel, die grossen Maxima, die den beiden Kältemaximis in Asien und Amerika

entsprechen. Auch die einzelnen in neuerer Zeit als charakteristisch eingehend untersuchten Maxima fallen auf den Winter und zeichnen sich durch grosse Kälte in den unteren Schichten aus. So das Barometermaximum vom 29. Dezember 1881,[78]) wo Frost herrschte; dann sagt Hazen,[79]) dass es feststehende Thatsache sei, dass das von ihm untersuchte weite Gebiet hohen Druckes in der ganzen Gegend die Temperatur bestimmte, eine Temperatur, die an vielen Stationen die niedrigste des ganzen Monats und an einigen die niedrigste des ganzen Winters war. Auch Hann[80]) giebt das zu.

Die Kontraktion der unteren Luftschichten als Entstehungsursache von Maximis dürfte dadurch erwiesen sein; es fragt sich jetzt nur, wie man ohne die kontinuierlich absteigenden Ströme, die ja jetzt nicht eintreten können,[81]) die höhere Temperatur in grösseren Höhen erklären kann. Die Temperaturumkehrung ist einmal in vielen Fällen bloss eine relative d. h. die Temperaturabnahme mit der Höhe weicht von der gewöhnlichen ab, aber die oben herrschende Temperatur ist absolut genommen für jene Höhenschichte nichts Anormales, sondern bloss im Vergleich zu der unten herrschenden Temperatur. Dann ist die Ursache also auch ohne Zuhilfenahme eines absteigenden Stromes lediglich in einer durch Strahlung erfolgten stärkeren Abkühlung der unteren Atmosphäre zu finden, wie dies eben auch den Anlass zur Bildung der Maxima giebt.

Jedoch wenn auch die Temperatur oben absolut höher ist, als unten, so giebt es dafür noch einfachere Erklärungen als den hypothetischen absteigenden Strom.

Wenn die Luft sich unten abkühlt und deshalb zusammenzieht, also kleineres Volumen einnimmt und noch dazu Druckwinde unten ausströmen, so wird von seitwärts Luft diesen Fehlbetrag ersetzen, dadurch kommt bereits eine Temperaturerhöhung zustande, da die von den Seiten einströmende Luft eine andere vertikale Temperaturabnahme zeigt, wie dort, wo es unten bereits kälter ist.

Aber wir wissen, dass oben sehr oft den untern entgegengesetzte Ströme herrschen,[82]) die können also warme Luft mitführen und so oben eine Temperaturumkehrung bedingen, es ist dies der von Möller[83]) als West-Süd-West-Passat bezeichnete warme Strom, der in der Höhe vom Äquator abfliesst.

Man findet auch in Tabellen über Windrichtung und thermische Wirkung derselben eine Übereinstimmung mit obigem, da die warmen Winde auf Pik Peak,[84]) Ben Nevis[85]) im Winter gegenüber den kalten sehr in den Vordergrund treten. Die näheren Belege finden sich in den citierten Abhandlungen und würden hier zu weit führen.

Dazu kommt aber noch ein Umstand, der die höhere Temperatur mit der Höhe erklärt.

Die Temperaturumkehrungen erreichen ihr Maximum hauptsächlich gegen Morgen.[86]) Nun ist bekannt, dass die Ausstrahlung an der Erdoberfläche grösser ist, als in der freien Atmosphäre, und dass die Ausstrahlung grösser ist, je grösser die ausstrahlende Fläche ist. Im Thal ist die Ausstrahlung eine grössere, als auf den nur wenig Fläche gegenüber der daneben liegenden Luft bietenden Bergabhängen und grösser, als in der freien Atmosphäre in der Höhe, welche ja die unten ausgestrahlte Wärme teilweise wieder absorbiert.

Das Auftreten vom Berg- und Thalwind zeigt, dass zwischen der Ausstrahlung von Land und Luft ein grösserer Unterschied ist.[87]) Während es also unten kälter wird, bis eine schützende Nebeldecke sich bildet, ist es oben wärmer und die warme Luft der freien Atmosphäre umgiebt auch die Bergspitzen und schafft so dort noch grössere Wärme. Denn die durch den Bergwind herabgeführte Luft an den Bergwänden wird durch die seitliche freie, also nach obigem wärmere Luft ersetzt. Vormittags aber, wo die Nebeldecke die untere Luft vor Insolation schützt, wird es wieder in der Höhe wärmer als unten. Der Betrag der Insolation darf nicht so unterschätzt werden, wie dies z. B. von

Hann[88]) gegenüber Hagen geschieht, denn um Berg- und Thalwinde hervorzurufen, bedarf es doch grösserer Wärmedifferenzen. Nachmittags ist dann die Abnahme der Temperatur wieder normal, da jetzt die Insolation auch unten stattfinden kann, da der Nebel sich gehoben. Auch die Ballonfahrt vom 11. Dezember 1890[89]) zeigte diesen Wärmeunterschied unter und über der Nebeldecke.

Das heitere Wetter der Anticyklone aber erklärt sich eben daraus, dass die obere warme Luft, sei es durch obere südliche Winde oder verminderte Ausstrahlung, die unten lagernde Nebeldecke von oben auflöst und es wird dies mit dem Ausdruck bezeichnet „der Nebel fällt", das heisst, es wird schönes Wetter.

III.

Die barometrischen Minima.

A. Depressionsfurchen.

1. Begriff.

Uebergehend zur Besprechung barometrischer Depressionen wird eine Scheidung zwischen Depressionsfurchen und eigentlichen Cyklonen vorteilhaft sein. Wir wollen im folgenden unter Furchen niederen Druckes nicht jene im Gefolge von Cyklonen erscheinenden Ausläufer oder Teilminima verstehen, wie dies öfter geschieht, sondern verstehen unter Furchen eine ganz bestimmte Art barometrischer Minima, die mit den Cyklonen nur den niederen Luftdruck im centralen Teil gemein haben. Da diese scharfe Scheidung bisher nicht bestanden hat, so können wir auch hier die Besprechung der herrschenden Ansicht über deren Entstehen unterlassen und dies bis zur Behandlung der eigentlichen Cyklonen versparen, bezw. mit diesen verbinden.

Die Furchen niederen Druckes, welche wir auf dem Atlantischen Ocean besonders häufig zu beobachten Gelegenheit haben, unterscheiden sich dadurch von den eigent-

lichen Cyklonen, dass der Barometerstand keine beträchtliche Abweichung vom Mittel zeigt, höchstens eine Tiefe von 750 mm als innerste Isobare, und dass die Längsachse dieser Gebilde mindestens das Dreifache der Querachse beträgt. Nicht zu verwechseln sind damit die sogenannten elliptischen Cyklonen, welche als deformierte Cyklonen tieferen Barometerstand, bedeutend grössere Gradienten und stärkere Winde haben. Der aufsteigende Luftstrom, wie er von den Vertretern der physikalischen Theorie als Ursache von Depressionen angesehen wird, kann wegen dieser eigentümlichen Längenerstreckung und des unverhältnismässig kleinen Centrums, wo der niedrigste Barometerstand herrscht, diese Gebilde nicht schaffen, denn es fehlt hier, völlig abgesehen davon, dass es schwer wäre, einzusehen, wie auf dem Meere bloss ein solcher Streifen höhere Temperatur haben soll, an der ablenkenden Kraft der Erdrotation, die ja bei jener Theorie die Hauptrolle spielt und bei elliptischen Cyklonen noch eher in Betracht käme. An den beiden Längsseiten einer solchen Furche findet man eine geringere Inklination der Winde, als bei Cyklonen, trotzdem der Gradient hier bedeutend grösser ist, als in der Längsrichtung, während an den beiden schmalen Enden der Furche starke centripetale Winde herrschen. Da hier also der Weg der Winde ein kurzer ist, so kann die ablenkende Kraft der Erdrotation nicht in Betracht kommen, es ergeben sich keine spiralförmigen Bahnen der Winde.

Durch die Güte des Geheimen Admiralitätsrates Herrn Dr. Neumeyer, welchem ich mich zu grossem Danke hierfür verpflichtet fühle, ist es mir möglich geworden, als Anhang zu dieser Abhandlung einige Wetterkarten beizugeben, die aus einem Zeitraum von sechs Jahren 1880 bis 1886 einige der interessantesten Belege enthalten. Die Originalkarten, welche von der deutschen Seewarte und dem dänischen meteorologischen Institut herausgegeben werden und die synoptische Wetterlage von ganz Nordamerika, dem östlichen Teil Südamerikas, Grönland, Europa

und Nordafrika, sowie die Schiffsbeobachtungen auf den zwischenliegenden Meeren enthalten, wurden von mir, um den Massstab nicht zu sehr verkleinern zu müssen, immer nur zu der einen Hälfte, welche jeweils das betreffende Gebilde enthält, photographiert und dann vervielfältigt. Und zwar enthält eine Tafel jeweils die Karten von zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit den Beobachtungen von 8^h morgens. Die Tafeln II, III, IV, V und VI des Anhanges vom bezw. 12./13. September 1881, 20./21. Februar 1882, 7./8. November 1883, 26./27. September 1886 u. 24./25. Oktober 1886 enthalten je auf der rechtsseitigen Karte die Isobaren solcher Furchen, welche alle drei inmitten des nördlichen Atlantischen Oceans auftreten.

Zum Unterschiede vergleiche man die Beispiele von elliptischen Cyklonen auf Tafel XVIII.

2. Entstehungsursache.

Die Beobachtungen an der Donau zeigen uns diese Furchen viel zahlreicher, als die eigentlichen Wirbel; zwischen den verschiedenen Strömungen bilden sie sich alle Augenblicke, werden wieder ausgefüllt und bilden sich neu. Sie legen keine so grossen Wege zurück, wie die Trichter, sondern wechseln höchstens ihre Umgrenzungsformen, wenn sie nicht überhaupt bald erlöschen.

Unsere frühere Beschreibung zeigte, dass sie in dem Zwischenraum zweier paralleler Strömungen entstehen und die Experimente Nr. 2 in fine 9 und 10 bestätigten dies. Wenn zwei Strömungen eine Strecke lang parallel so nebeneinander fliessen, dass sie nur durch ein schmales Gebiet mit anderen Strömungsverhältnissen, z. B. relative Stille, getrennt sind, so bildet sich dieser schmale Streifen bald zu einer Furche aus. Besonders günstig sind die Bedingungen, wenn die parallelen Ströme nicht nur verschiedene Geschwindigkeit, sondern auch entgegengesetzte Richtung haben. Dieselben Erscheinungen finden wir auch bei

der Luft, wenn zwei parallele Windströmungen nebeneinander entgegengesetzt fliessen, es bilden sich dann dazwischen solche Furchen aus. Figur 2 auf Tafel I giebt ein schematisches Bild der Wetterlage, welche dem Entstehen einer Furche günstig ist. Die punktierten Isobaren zeigen die im Entstehen begriffene Furche. Auf dem Atlantischen Ocean fand ich fast durchgängig innerhalb der fünf Jahrgänge, dass ein nördlicher und ein südlicher Strom solche Furchen zwischen sich schufen, woraus folgt, dass die Längsachse der Furche in der Regel von S nach N gerichtet ist, was auch mit anderen Beobachtungen übereinstimmt.[90])

Auch unsere Karten, Tafel II, III, IV, V, VI, zeigen diese beiden Ströme.

Am 12. September 1881, Tafel II, finden wir westlich des 25.° w. L. v. Gr. zwischen 35° und 55° n. Br. einen durch die naturgemäss nicht allzu zahlreichen Beobachtungen dennoch deutlich ausgeprägten, beinahe reinen Nordstrom, während östlich des 20.° w. L. von 30° Br. bis nach Island hinauf ein breiter Südstrom notiert ist. Während nun am 12. September zwischen den beiden Strömen allerdings eine leichte Depression bereits vorhanden sein muss, wie die elliptische Isobare 760 zeigt, in deren Innenraum trotz einiger Beobachtungsdaten jedoch noch keine Isobare von 755 auftritt, zeigt die Karte vom 13. September 1881 an derselben Stelle, wo die eigentliche Grenze zwischen dem S und N Strom am 12. September war, nämlich zwischen 20° und 25° w. L. eine ausgeprägte Furche, deren innerste, sehr kleine Isobare 750 ist, die Isobare 755 und noch mehr 760 lassen die charakteristischen Achsenverhältnisse der Furche klar erkennen.

Ähnlich sind die Verhältnisse am 20. Februar 1882, Tafel III: Östlich des 40.° w. L. v. Gr. zwischen 19° und 50° n. Br. herrschen S Winde, westlich jenes Längengrades finden wir einen NE Strom notiert. Am folgenden Tag, 21. Februar, ist auch hier wieder eine ausgebildete sehr

lange Furche vorhanden, welche jedoch mehrere getrennte Stellen tieferen Druckes zeigt, die ausgebildetste hat eine centrale Isobare von 750 mm.

Die Karte vom 7. November 1883, Tafel IV, giebt ebenfalls die Entstehungsbedingungen einer Furche.

Europa steht unter niederem Druck, dessen Centrum etwas südlich von Island liegt.

Wir haben die Windverhältnisse des Nordamerika anliegenden, westlichen Teiles des Oceans zu betrachten. Bereits von 20° s. Br. zwischen 50° und 60° w. L. finden wir SE Winde, die allmählich in reinen Süd übergehen und bis gegen Neufundland sich erstrecken. Der 60.° w. L. ist ungefähr die westliche Grenze dieses Südstromes. Über die Lorenzomündung und längs der nordamerikanischen Küste wehen NNW Winde. Am 8. November finden wir etwas südlich von Neuschottland ein kreisförmiges Depressionscentrum von 750 mm Tiefe, umgeben von der elliptisch geformten Isobare 750, die weiter nach Süden reicht und deren grosse Achse von SSE nach NNW zeigt. Also ganz entsprechend den Ableitungen über Furchenbildung. Am 7. November ist in der ganzen Umgebung hoher Druck gewesen.

Am 26. September 1886, Tafel V, weht längs der Ostküste von Nordamerika von Newyork bis zur Mündung des Lorenzostromes ein SW Strom. Der anliegende Teil des Atlantischen Oceans ist von einem grossen Gebiet hohen Drucks (über 765 mm) bedeckt. Aus der Gestalt der Isobare 765 und 760 ungefähr zu beiden Seiten des 56.° w. L. v. Gr. und aus den in diesen Gegenden eingezeichneten Schiffsbeobachtungen findet man das Vorhandensein eines Nordoststromes zwischen 50° und 40° n. Br., dessen Fortsetzung noch die Beobachtung D 60 [30° n. Br. 71° w. L.] angiebt. Wir haben also zwei parallele Ströme und finden deshalb zwischen ihnen am nächsten Tag eine leichte furchenähnliche Depression südöstlich von den Inseln Halifax und Neufundland, deren grosse Achse von

SW nach NE gerichtet ist. Das Maximalgebiet ist südöstlich fortgezogen; der Nordoststrom aber jetzt von einem SW, der SW an der Küste aber von einem NE Strom abgelöst.

Auch am 24. Oktober 1886, Tafel VI, sind die Witterungsverhältnisse der Entstehung einer Furche günstig: Östlich des 40.° w. L. v. Gr. finden wir einen S Strom, der in höheren Breiten nach NE umbiegt, während westlich des 50.° w. L. zwischen 50° und 40° n. Br. ein starker N Strom notiert ist. Am 22. Oktober hat sich wiederum zwischen diesen beiden Strömen eine ausgedehnte Furche gebildet. Bei den spärlichen Aufzeichnungen auf dem Atlantischen Ocean,* sowie bei den immer nur von 24 zu 24 Stunden eingetragenen Isobaren und Beobachtungen kann man freilich nicht verlangen, dass tags vorher überhaupt noch keine Andeutung einer Depression vorhanden, sei, aber immerhin glaube ich, dass parallele Ströme vorhanden waren und aus der tags vorher nur angedeuteten meist sogar an anderer Stelle befindlichen Depression sich eine ausgeprägte Furche entwickelte, die genau jenem Ort entspricht, wo die Grenze der beiden parallelen Strömungen lag.

So wenig sich bei einem Fluss genau feststellen lässt, in welchem Moment die Furche entsteht, da, sobald die Strömungen parallel werden, auch die Bildung der Furche anfängt, so ist es auch bei dem Luftocean, dessen Strömungen ja auch in fortwährendem Wechsel begriffen sind, und ist die Furche entstanden, so wirkt sie ihrerseits wieder auf die Richtung der Ströme, was die Entstehungsursache wieder verwischt. Auch sind in der Nähe andere Gebilde, die die Ströme wieder beeinflussen, und so kann eine Wetterkarte nie so durchsichtige Resultate wie unsere früheren Experimente ergeben.

Solche parallele Ströme nebeneinander mit verschiedener Richtung sind in jenen Breiten nichts Ungewöhnliches, zumal über dem Ocean, wo weniger Strömungen als auf dem Festland eintreten, indem dort nach alten Beobachtungen, denen man in neuerer Zeit auch theoretisch wieder

näher kommt, der Äquatorialstrom herunter kommt und neben dem Polarstrom vorbeigeht, der auch unten ist, aber wegen der zunehmenden Breite der Erdoberfläche den Platz nicht mehr allein ausfüllt.[91])

Die Entstehung einer Depression zwischen zwei solchen antiparallelen Strömungen ist so zu erklären, dass die zwischenliegende ruhige Luft an beiden Seiten mitfortgerissen wird und also in der Mitte dieses Streifens eine Luftverdünnung eintreten muss.

An beiden Längsseiten wird ruhigere Luft mitgerissen und dadurch die andere Bewegung gehemmt, es kommen also schwächere Winde zustande; an den beiden Endpunkten jedoch, wo die parallelen Ströme einander wieder nahe treten können, wird aussen eine Stauung hervorgerufen und so der durch die Verdünnung innen bereits bestehende Gradient nach früherem noch verstärkt.

Die Länge der Furche hängt ab von der Länge derjenigen Strecke, längs welcher die beiden Ströme parallel bleiben. Die Annahme, dass Furchen parallelen Strömen ihre Entstehung danken, lässt sich also auch theoretisch begründen.

Dass die Ströme das primäre Element sind und nicht etwa, wie dies die physikalische Theorie thut, zuerst die Furche da sein muss, um die Ströme hervorzurufen, wird man an den praktischen Beispielen wohl sofort einsehen. In allen diesen Fällen finden wir die eingangserwähnte eigentümliche Inklination der Winde, denn die Ströme, welche an den beiden Längsseiten der Furche vorbeifliessen, zeigen nur eine geringe, nur in nächster Nähe der Vertiefung bemerkbare Inklination, während an den Endpunkten das Gegenteil der Fall ist. Wäre die Furche primär, so könnte das nie möglich sein.

Weiters aber finden wir, dass die Ströme sich noch über die Furchenenden hinaus verfolgen lassen, und zwar in gleicher Richtung, welche sie an den Längsseiten der Furche hatten, eine Thatsache, die gewiss für unsere Behauptung spricht.

Am 13. September 1881 sind nördliche Winde vom Furchenende bei 40° n. Br. noch bis 20° n. Br. notiert; man erkennt noch ganz gut die beiden Ströme des Vortages. Ebenso am 21. Februar 1882, wo nördliche, sowie südliche Winde noch weit über die Furche hinausgehen und oberhalb bereits Anfänge neuer Furchen bilden. Dasselbe lässt sich aus der Isobarengestalt vom 25. Oktober 1886 mangels Aufzeichnungen ablesen. Bei den Wasserfurchen beobachtet man an den beiden Längsseiten leichte Erhöhungen, und ebenso bestehen neben der Furche in der Atmosphäre Maximalrücken, da ja die aus der Furche ausgetretene Luft an der Seite zum Vorschein kommen muss und so die Masse der vorbeifliessenden Luft vermehrt. Diese Furchen meint wohl auch Loomis,[92]) wenn er sagt, dass sich zwischen zwei Gebieten mit höherem Luftdruck in E und W gern Depressionen bilden. Denn diese Wetterlage erzeugt, wie Figur 2 auf Tafel I zeigt, eben zwei antiparallele Ströme, welche dann der Entstehung einer Furche besonders günstig sind.

Die Fortpflanzung der Furche kann nur in der Weise geschehen, dass allmählich wieder andere Strecken der Ströme parallel werden, und so ist selbstverständlich, dass diese Furchen, ebenso wie beim Wasser, keine weiten Bahnen zurücklegen, sondern stationär bleiben und bald erlöschen, wie dies auch in den Beispielen der Fall war. Sie gehen deshalb auch nicht auf den Kontinent hinüber, weil hier der Parallelismus der Ströme sich meist nicht mehr erhalten kann.

Übrigens ist die Beobachtung, dass zwischen parallelen nahezu entgegengesetzten Strömungen sich Depressionen ausbilden, schon öfter gemacht worden, so von Meldrum[93]) und Lasne.[94])

B. Die eigentlichen Cyklonen.

1. Die physikalische Theorie.

Bis vor kurzer Zeit war es allgemein üblich, in einer anormalen Erwärmung der unteren Luft und in der daraus entstehenden aufsteigenden Tendenz die Ursache der Cyklonen zu suchen und wie beim absteigenden Strom findet man auch hier vor allem mathematische Ableitungen, die sich auf jenem aufsteigenden Strom aufbauen; aber die Frage, wie eigentlich und warum ein aufsteigender Strom mit bedeutendem Wärmeüberschuss zustande kommt, das war sehr in den Hintergrund getreten.

Auf dem Atlantischen Ocean, wo die meisten unserer Cyklonen entstehen, herrscht zwar eine sehr gleichmässige Temperaturverteilung, aber da nun einmal die Cyklonen dort entstanden, so musste eben doch eine anormale Temperaturverteilung dagewesen sein, und konnte man diese auch nicht nachweisen, so war immer die latente Wärme des mitgeführten Wasserdampfes da, um die Hypothese des aufsteigenden Stromes zu retten. Dass die Cyklonen nicht über dem Busen von Mexiko, wo es am wärmsten wäre, sondern nördlich von Venezuela am heftigsten auftreten,[95]) das änderte nichts an der Richtigkeit der Hypothese!

Auch bei grossen Bränden entstehen, obwohl da ein Temperaturüberschuss vorhanden wäre, keine Cyklonen, ein paar kleine Wirbelchen vielleicht; erst neuerdings erschien eine Notiz von A. Eaton,[96]) wonach bei den grossen Schilfbränden nach den Überschwemmungen des Kings River höchstens ein paar Wolken, nie aber eine Cyklone entsteht.

Das bei uns beobachtete Fortrücken der Cyklonen in östlicher Richtung war schnell in der Wirkung des dort einströmenden S-Windes gefunden,[97]) dass die Cyklonen

jedoch vor der bekannten Umkehrung nach West ziehen, das ist eben eine Unregelmässigkeit.

Wo der erste Faktor nicht hinreichte, so besonders bei der längeren Fortdauer der Cyklone, ergänzte die freiwerdende Wärme des beim Aufsteigen kondensierten Wasserdampfes das Fehlende. Dass jedoch die freigewordene Wärme grösstenteils wieder dazu benützt werden muss, das ausgeschiedene Wasser in Dampf zu verwandeln und dass auch die ausgedehntesten Niederschläge keine Cyklonen hervorbringen, sondern sogar Luftdrucksteigerung,[98]) konnte die Richtigkeit jener Theorie nicht erschüttern.

Dass die Cyklonen bei ihrem Fortrücken die kalten Gegenden aufsuchen, die sogenannte Polartendenz, dass durch die der Cyklone vorangehende Bewölkung die Einstrahlung und somit die Bedingungen eines aufsteigenden Stromes sich sehr verschlechtern, wurde wenig beachtet, und trotzdem die Heftigkeit der Cyklonen nachts und im Winter am grössten ist,[99]) wurde dennoch eine grössere Energie des aufsteigenden Stromes in dieser Zeit angenommen.

Es giebt auch nicht selten Cyklonen ohne Niederschläge;[100]) wer unterhält da den aufsteigenden Strom?

Endlich angenommen, es sei der aufsteigende Strom vorhanden und dauere fort, so wird dessen vertikale Geschwindigkeit von Linss[101]) auf 0,10 m pro 1 Sekunde angegeben.

Da dort, wo der aufsteigende Strom beginnt, keine Windstille vorausgesetzt werden kann, so findet man, eine horizontale Windgeschwindigkeit von 6 m pro Sekunde angenommen, dass dann die Achse des aufsteigenden Stromes und somit also auch die Achse der Cyklone eine Neigung von nur $0^{0}57'$ gegen den Horizont hätte, was der Wirklichkeit absolut nicht entspricht. Es müsste ein aufsteigendes Luftteilchen den horizontalen Weg von ca. 230 Kilometer zurücklegen, um die durchschnittliche Höhe einer Cyklone zu 3000 m zu erreichen,[102]) was wiederum

nicht den Beobachtungen über die oft sehr geringe horizontale Ausdehnung einer Cyklone entspricht.[103]) Zeichnet man einen Wirbeltrichter mit einer solchen schiefen Achse, so findet man, dass damit ein Gebilde zustande kommt, das unseren Cyklonen, resp. der Druckverteilung in denselben bezogen auf den Meeresspiegel, in keiner Weise entsprechen kann.

Bei den kleineren aber heftigsten Cyklonen der niederen Breiten[104]) begegnen wir noch einer weiteren Unzulänglichkeit des aufsteigenden Stromes, derselbe soll eine Einströmung der seitlichen Luft verursachen, die durch die Erdrotation in der Weise abgelenkt wird, dass auf der nördlichen Halbkugel der linksdrehende Wirbel entsteht. Gerade in jenen Breiten ist aber die ablenkende Kraft der Erdrotation eine so geringe, dass in ihr unmöglich die Ursache jener Orkane gefunden werden kann. Nehmen wir z. B. die in Berghaus' physikalischem Atlas[105]) abgebildete Cyklone vom 13. August 1837, so beträgt deren Durchmesser ca $2^1/_2$ Breitegrade. Der doch lediglich in Betracht kommende Unterschied der Geschwindigkeit eines Lufteilchens von $16^1/_2{}^0$ Br. bis 19^0 Br., zwischen welchen unsere Cyklone beobachtet wurde, beträgt nun, da die Luft als mit der Erde rotierend angenommen werden kann:

$$\frac{2\,r\,\pi}{T}\,(\cos\varphi - \cos\varphi') = \frac{1718{,}87 \cdot 7420{,}44 \cdot 3{,}14}{24 \cdot 3600} \times$$
$$(\cos\ 16^1/_2{}^0 - \cos\ 19^0) = \text{ca } 6{,}2 \text{ m},$$

wenn r der Erdradius und T die Rotationszeit der Erde, diese als Kugel betrachtet, bedeutet.

Dieser Geschwindigkeitsunterschied hat kaum die Stärke eines eben bemerkbaren Windes, kann also nicht Ursache der bedeutenden Wirbelgeschwindigkeit sein.

Dasselbe trifft in noch höherem Masse bei den verwandten Tornados zu, für die ja die gleiche Entstehungsweise angenommen wird; bei letzteren und bei kleineren Cyklonen wird sogar zugegeben, dass ihre Drehung auch

gegen die Erdrotation geschehen kann,[106]) aber woher sie ihr Drehungsmoment und ihre sehr bedeutende Winkelgeschwindigkeit bekommen, wird nicht näher angegeben.

Dass in der ablenkenden Kraft der Erdrotation nicht ausschliesslich die Ursache von Wirbelbewegung zu suchen ist, beweisen am schlagendsten die analogen Wasserwirbel.

Einen argen Stoss hat die Konvektionstheorie durch die Beobachtungsnachweise von Hann[107]) erhalten, wonach die Luft in der Cyklone nicht, wie bisher auf Grund der primären[108]) Hypothesen angenommen wurde, warm,[109]) sondern im Gegenteil bis zu bedeutender Höhe sogar kälter als in der Anticyklone ist. Aber der aufsteigende Luftstrom wird deshalb noch lange nicht aufgegeben, man verlegte dessen Entstehen eben jetzt in noch grössere Höhen,[110]) wenn dafür auch noch viel weniger ein Beweis gebracht werden kann, oder man nimmt einen absteigenden Strom,[111]) denn ohne auf- und absteigende Ströme als Ursache glaubt man eine Theorie der Cyklonen und Anticyklonen nicht aufstellen zu können. Der labile Gleichgewichtszustand wird dann auch hier wie bei den Maximalgebieten als primär angenommen und darauf weiter gebaut. Wenn man nun für die Cyklonen auch absteigende Ströme zu Hilfe nimmt, so fragt es sich, woher bezieht die dazu gehörige Anticyklone ihre Luft, da dort auch die Luft absteigt und wie und wo wird die Luft dann wieder hinaufgeschafft?

Eine abgeschlossene Theorie liegt auch hier nicht vor, das wird zugegeben,[112]) und nur darauf aufmerksam gemacht, dass man die Ursache der Cyklonen mit der allgemeinen Luftcirkulation in Zusammenhang bringen müsse.

Ebenso wie beim absteigenden Luftstrom wollen wir auch hier über die Natur des aufsteigenden einiges erwähnen, dass derselbe in der Art nicht wohl denkbar ist, wie er jetzt als cyklonenbildend zu Grunde gelegt wird.[113]) Dass es aufsteigende Strömungen giebt, ist ausser Zweifel, nämlich dort, wo eine beständige Wärmequelle vorhanden ist, z. B. über dem Äquator. Über anderen abge-

grenzten Gebieten eine fortdauernde Wärmequelle zu finden, die sogar mit der Cyklone weiter wandelt, wird schwerlich nachzuweisen sein und doch muss die Wärmequelle fortdauern, denn sonst erlischt der aufsteigende Strom und mit ihm die Cyklone sehr schnell.

Hann[57]) hat bereits nachgewiesen, dass der Cyklonenkörper bis zu grossen Höhen kalt ist, was also einen aufsteigenden Strom ausschliessen würde. Möller[110]) verlegt deshalb die Energiequelle in noch grössere Höhen und spielt hier der Wasserdampf wieder seine Rolle. Hann[114]) weist auf die Unzulänglichkeit dieser Annahme hin. Trotzdem bleiben die aufsteigenden Ströme immer noch der Ausgangspunkt[115]) der Cyklonen, nur dass man nebenher auch Cyklonen, mit dem hypothetischen absteigenden Luftstrom als Ursache, anerkennt. Das Aufsteigen der Luft an sich bringt keine Barometerdepression zustande, da ja unser Barometer nicht die Dichtigkeit, sondern das absolute Gewicht misst, eine fortdauernde Cyklone erfordert also einen fortdauernden aufsteigenden Strom, der oben abfliesst. Nun dringt aber unten sofort wieder dichte Luft nach, infolge dessen eine stärkere Barometerdepression auch aus dem Aufsteigen und Obenabfliessen der Luft nicht resultieren kann. Abgesehen davon wäre auch das grössere Gewicht eines steigenden Körpers zu berücksichtigen,[116]) was ich nirgends angeführt fand.

Doch angenommen, erwärmte feuchte Luft steige in die Höhe, so dehnt sie sich aus und wird deshalb kälter. Dabei kommt sie endlich zu einer Temperatur, bei welcher die Wasserdämpfe ihren Sättigungspunkt erreichen. Darüber hinaus findet Condensation des Wasserdampfes statt und damit ist Freiwerden der latenten Wärme verbunden. Die Lufttemperatur wird erhöht. Diese Temperaturerhöhung kann aber nie so weit gedeihen, dass dadurch alles entstandene Wasser wieder verdunstet, denn ausserdem wäre die Wolkenbildung gar nicht eingetreten. Durch Wolkenbildung ist die umgebende Luft absolut trockener geworden

und vergrössert sich die Wolke, so kann dies nur durch weitere Erniedrigung des Sättigungspunktes geschehen, die Luft muss also kälter geworden sein. Mit fortgesetzter Wolkenbildung, wie wir sie gerade bei den Depressionen jedesmal beobachten, ist also unfehlbar Temperaturerniedrigung der umgebenden Luft verbunden. Wolkenbildung und Temperaturerhöhung der umgebenden Luft schliessen sich gegenseitig aus und ist somit keine Wärme da, die die Luft weiter emportragen könnte.

Auch wäre kein Grund sonst einzusehen, warum Cyklonen erlöschen, denn wenn von unten immer neue feuchte Luft durch die oben freiwerdende latente Wärme hinaufgeschafft wird, so kann auch die Cyklone immer fortbestehen und nur die Intensität je nach Feuchtigkeit der unten nachgeschafften Luft wechseln.

Die dem Wirbel aus der Umgebung zuströmende Luft hat vermöge der Neigung der Isobarenflächen gegen das Centrum desselben doch eine vertikal nach abwärts gerichtete Geschwindigkeitskomponente. Ist diese Luft nun im Wirbel angekommen, so soll sie emporsteigen, da ja sonst der Wirbel erlischt; woher kommt aber die Kraft, die die vertikal nach abwärts gehende Komponente nun plötzlich in einen vertikal nach aufwärts gerichtete umwandelt? Überhaupt wenn die Bewegung im Wirbel eine kontinuierlich aufsteigende ist, so muss sich derselbe bald auflösen, da unten dichte Luft einströmt, so dass also die Depression ausgeglichen wird; überhaupt muss ein unten in einen Wirbel dringender Strom den Trichter ausfüllen und die wirbelnde Bewegung hat dann ein Ende, wie sich jeder leicht bei Wasserwirbeln überzeugen kann.

Das Aufsteigen der Luft, wie es sich wirklich vollzieht, hat Lamont[117]) sehr klar dargestellt. Da findet man nichts von kontinuierlichen Luftströmen. Bei allen daraufbezüglichen mathematischen Deduktionen wird auch hier wie beim absteigenden Strom eine ständige Kraftquelle vorausgesetzt und Geschwindigkeit und Temperatur des aufsteigenden

Stromes nach gewissen Endresultaten geregelt, auf die Fortdauer und die dadurch bedingten Änderungen der ganzen Bewegung und somit des ursprünglich labilen Gleichgewichtszustandes der Luft wird weniger geachtet. Man müsste doch sonst, wie Lamont[118]) bemerkt, sehr oft auch Wolken in vertikaler und nicht immer in horizontaler Richtung ziehen sehen. Es kehren also hier unsere Ausführungen auf das über absteigende Ströme Gesagte zurück.[119])

Das Aufsteigen wie das Absteigen beruht nicht auf einem kontinuierlichen Strome, der von vornherein vorhanden ist, sondern ist ein Auf- und Abwogen zum Ausgleich vorhandener immer örtlich und zeitlich wechselnder Unregelmässigkeiten des atmosphärischen Gleichgewichts, und ein solches Auf- und Absteigen der Luft kann nicht Quelle sein solcher lange andauernder, kontinuierlich weiterziehender Gebilde, wie die Cyklonen sind.

2. Die mechanische Theorie.

Die zweite Richtung der Theorien der Cyklonen ist, wie früher bemerkt, die mechanische. Ihre Hauptvertreter sind Faye,[120]) Andries,[121]) Hirn[122]) u. a.

Sie verwerfen den aufsteigenden Strom als unzulänglich und nach ihrer Theorie entspringen die Wirbel in den oberen Regionen der Atmosphäre und zwar geben die grossen oberen Ströme den Anstoss zur Wirbelbildung. Andries z. B. lässt einen oberen Luftstrom, dessen plötzliche Herkunft jedoch verschwiegen wird, ein Fehler, den wir schon am Anfange dieser Arbeit nachwiesen, in ruhige Luft dringen und dadurch zu seinen beiden Seiten entgegengesetzt drehende Wirbel sich bilden; derjenige der letzteren, welcher entgegen dem Buys Ballotschen Gesetz dreht, erlischt gleich beim Beginn.

Die Möglichkeit, dass so Wirbel entstehen, ist ja gegeben — wir fanden sie auch bei der Donau — aber die regelmässige Entstehungsursache der atmosphärischen Cyklo-

nen ist es nicht, denn ruhige Luft dürfte in jenen Regionen selten sein, und da, wo sie ist und wo auch ein oberer Strom — der Antipassat — durchweht, nämlich in den Kalmen, werden gerade keine Cyklonen beobachtet; dann dürfte doch das „ungeheure Kraftreservoir der oberen Luftströme“[123]) auch imstande sein, den anderen Wirbel entgegen der geringen ablenkenden Kraft der Erdrotation in niederen Breiten auszubilden, wenigstens müsste er in den Wetterkarten als seichte Depression sich zeigen. Endlich lässt unsere Beschreibung der Donau erkennen, dass dieser Art entstehende Wirbel sehr klein sind, dagegen hintereinander in grosser Anzahl folgen, eine Thatsache, die bei unseren Cyklonen auch nur selten zutrifft.

Andries[124]) erklärt später die Wirbelentstehung durch das Durchkreuzen zweier oberer Luftströme, wodurch auch wieder jene zwei Wirbel entstehen sollen. Wie sich zwei obere Luftströme durchkreuzen, d. h. wie da die Druckverteilung oben beschaffen sein müsste, das wird übergangen und doch wäre zu allererst zu beweisen, dass dies möglich ist.

Aber angenommen, zwei obere Luftströme treffen aufeinander, so möchte es doch sehr schwer gehen, dass sie sich durchkreuzen wie zwei Wellen und in den beiden Scheitelaussenwinkeln Wirbel bilden, denn das ungestörte Durchfliessen eines Luftstromes durch einen anderen ist nicht möglich, sondern der stärkere versperrt dem schwächeren den Weg und es findet nur ein gemeinsames Weiterfliessen in der Resultante statt. Unsere Experimente zeigen ebenfalls die Unmöglichkeit einer solchen Durchkreuzung. Die Entstehung der Wirbel von oben, wie Faye sie annimmt, ist durch Sprung[125]) bereits widerlegt.

Die oberen Luftströme eignen sich nicht als Hauptursache der Cyklonenbildung; z. B. die Cyklonen zur Zeit des Monsunwechsels[126]) sprechen dagegen; dann aber müsste doch die Fortpflanzung der Cyklone der Geschwindigkeit der oberen Ströme etwas besser entsprechen: Eine Tabelle von Vettin[127]) über Cirrusgeschwindigkeit enthält

für eine Höhe von 3000 m eine Windgeschwindigkeit von 11 m pro Sekunde, für eine solche von 5000 m eine von 17 m. Da bis zu dieser Höhe sich durchschnittlich die Cyklonen erstrecken, so stimmt ihre mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 7,4 m, wie sie v. Bebber[128]) gefunden hat, sehr schlecht mit obigen Zahlen überein. Überhaupt finden sich genug Beweise dafür, dass die cyklonalen Bewegungen sich auf die untere Atmosphäre beschränken.[129])

Mit der Entstehung der Cyklonen durch obere Luftströme dürfte das Cl. Ley-Hildebrandssonsche Schema der Cirrusbewegung unvereinbar sein; denn wenn die Cyklone selbst in jener Cirrusregion zur Entstehung gelangt, müssen doch die Cirren gegen ihr Centrum ziehen und nicht gerade an der Vorderseite davon weg.

Endlich dürfte sich die Rückwärtsneigung der Cyklonenaxen[130]) nicht erklären lassen, wenn sie durch obere Ströme von oben entstehen.

3. Wirkung des Zusammenstosses von Luftströmen und Wirbelbildung.

Die eingangs beschriebenen Wasserwirbel, sowie die Experimente lassen es als sehr wahrscheinlich erscheinen, dass eine analoge Anwendung auf die Luftwirbel oder die eigentlichen Cyklonen von Erfolg begleitet sein muss. Grundbedingung für die Entstehung von Wirbeln durch Zusammenstoss von Luftströmen ist, dass diese Ströme wenigstens in annähernd gleichem Niveau liegen, seien es also zwei obere oder zwei untere Ströme.

Dass nur die oberen Ströme unsere Cyklonen hervorrufen, ist im vorhergehenden widerlegt, aber falls sie zusammenstossen, dass sie Wirbel erzeugen können, ist möglich. Es mögen daher vielleicht manchmal die seichten Depressionen, die man an der Erdoberfläche beobachtet, ihren Ursprung haben.

Die regelmässige Ursache der von uns beobachteten Cyklonen wird aber im Zusammenstoss von unteren Luftströmen zu finden sein. Von letzteren allein haben wir auch früher nachgewiesen, dass sie zusammenstossen müssen, ich erinnere an den Druck- und Saugwind, die beide untere Ströme sind. Ferner sinken obere Ströme allmählich herab, weil die unteren Winde den Raum nicht mehr ausfüllen und suchen neben den unteren Strömen weiterzufliessen, auch dadurch können Zusammenstösse zweier Ströme znstande kommen. In den Wetterkarten sieht man ja oft genug breite mächtige Ströme notiert, die nebeneinander fliessen, jedoch verschiedene Richtung verfolgen. Ich erwähne noch die Monsune: beim Monsunwechsel müssen beide Monsune doch eine Zeit lang nebeneinander bestehen, bis endlich der eine die alleinige Herrschaft erringt. Und gerade diese Zeit, wo der eine den anderen verdrängt, ist die eigentliche Cyklonenzeit des indischen Oceans.[131])

Die Experimente Nr. 3, 5, 7 und vor allem 12 zeigen die Bedingungen, unter denen durch den Zusammenstoss von Winden Wirbel entstehen. Sie sind am günstigsten, wenn die Ströme unter einem Winkel von 45^0 bis 90^0 zusammenstossen.

Die Wirbelbewegung leitet sich von unten ein. Experiment Nr. 3 zeigt dies ganz deutlich und ist auch bei anderen Kombinationen nachweisbar. Einzelne Teilchen unten nehmen eine drehende Bewegung an, die immer schneller wird, bis endlich erst die an der Oberfläche sichtbare Trichtervertiefung eintritt. Beim Wasser sieht es aus wie eine Perlenschnur.[132]) Auch die erwähnten Versuche von de Maistre zeigen, dass die Trichtergestalt durch Einleitung der Rotation von unten entsteht und dass das Trichterende nie unter die Rotationsquelle hinabreichen kann (cf. wenn das Rädchen in der Mitte angebracht ist). Daraus resultiert wiederum, dass die oberen Ströme in der Regel nicht die Quelle unserer Cyklonen sein können, denn da obere und untere Ströme selten gleichgerichtet

sind, so kann sich die Trichterspitze nicht in die unteren Regionen erstrecken und also auch nicht die bekannte Kalme der Cyklone gebildet werden, wie dies z. B. Andries fälschlich annimmt.

Aus der Enrstehung des Wirbels von unten erklärt sich ausser der später zu erwähnenden Cirrusbewegung auch die vielfach beobachtete Rückwärtsneigung der Cyklonenaxe.[133]) Denn bis das sich immer neu ausbildende Trichterende die Rotation der unteren Luftteilchen durch Reibung in immer höhere Schichten mitteilt, hat es sich horizontal weiter bewegt, ehe oben der Wirbel sich ausbildet. Es giebt also eine schiefe, nach rückwärts in Bezug zur Fortpflanzungsrichtung der Cyklone geneigte Axe.

Die Ausbildung des eigentlichen Wirbels hat man sich dann so zu denken, dass dem schwächeren der beiden Ströme ein stärkerer in die Seite fällt, oder umgekehrt, und so sein Weiterfliessen hindert. Es bildet sich also zunächst eine Stauung und daneben eine Luftverdünnung, nämlich dort, wo der erste Strom hingekommen wäre, wenn ihm nicht der andere den Weg abgeschnitten hätte. Neben der Stelle, wo die Luft verdünnt ist, befindet sich dichtere Luft, welche bestrebt sein wird, jene Vertiefung wieder auszufüllen. Auf geradem Wege kann sie das jedoch nicht. Infolge der Trägheit haben die Luftteilchen der beiden komponierenden Ströme eine Bewegung, deren Richtung tangential gegen den mit verdünnter Luft erfüllten Raum ist, und weil sie nicht gerade gegen das Centrum gehen können, muss ein Wirbel zum Vorschein kommen. Es entstehen also spiralförmige Bahnen, wie wir das auch bei den Wasserwirbeln vorfinden. Jedoch legt nicht jedes Teilchen diesen ganzen Weg zurück, sondern giebt seine Bewegung an das nächste Luftteilchen ab, ähnlich wie eine Welle aus immer anderen Teilchen besteht. Die auftretende Centrifugalkraft verhindert ein sofortiges Ausfüllen des luftverdünnten Raumes und sucht denselben, infolge der Druckabnahme mit der Höhe nach oben stetig zu erweitern. Es

bildet sich also ein Trichter aus. Das ergiebt sich auch aus der Betrachtung, dass die Centrifugalkraft dem Druck der einströmenden Luft das Gleichgewicht halten muss. Bedeutet r den Radius des Wirbels, h seine Höhe und v die Geschwindigkeit, so muss sein:

$$\frac{2\,m\,v^2}{r} = gh.$$

$$v^2 = \frac{4\,r^2\,\pi}{t^2}; \text{ also } t = \sqrt{\frac{4\,r\,\pi^2}{gh}} = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{r}{gh}}$$

Kennen wir also die Umlaufszeit eines Teilchens, so wird daraus die Geschwindigkeit der spiralförmig absteigenden Teilchen gefunden. Aus $\frac{2\,m\,v^2}{r} = gh$ ergiebt sich, dass der Radius des Wirbels um so kleiner wird, je mehr die Höhe des Wirbels zunimmt, dass also ein Trichter entsteht.

Nicht ein innen aufsteigender Luftstrom schafft die Luftdruckverminderung, sondern lediglich die durch den Zusammenstoss der beiden Ströme eintretende Luftverdünnung. Woher übrigens bei den neueren Ansichten, dass auch ein absteigender Luftstrom eine Cyklone hervorrufen könne, die Luftdruckvertiefung kommt, ist nirgends zu finden.

Die analytische Behandlung der Bewegung gestaltet sich deshalb schwierig, weil die nach dem Zusammenstoss resultierende Geschwindigkeit, sowie der Grad der Luftverdünnung unbekannt sind, ausserdem aber bleiben die dem Centrum zustrebenden Teilchen nicht in derselben Horizontalschichte, und für solche Probleme fehlen noch alle Anhaltspunkte. Übrigens könnte man die Gleichungen von Guldberg, Mohn, Oberbeck und anderen auch auf diese Wirbelentstehung ausdehnen, wenn man statt der ablenkenden Kraft der Erdrotation jene Kraft einführt, welche die Teilchen entgegen der Anziehung des Wirbelcentrums zu spiralförmigen Bahnen zwingt, und welche eine Funktion der die Verdünnung bewirkenden Stromstärken ist. Man müsste jedoch weiters die Bewegung der Luftteilchen nicht allein als

Funktion des Luftdruckes darstellen, sondern da ja eine radiale Abnahme des Luftdruckes nicht ursprünglich vorhanden ist, die entstehenden Gradienten als Funktion der wirbelnden Bewegung auffassen, wie wir dies früher bereits allgemein darlegten.[134])

Mit der Entstehung des Wirbels hängen aufs engste die Gestaltungen der Isobarenkurven zusammen. Dem Trichterende entspricht die räumlich kleinste Isobare, dieselben nehmen dann nach aussen an Umfang zu in demselben Masse, als der Trichter sich erweitert. Dass nicht jeder Wirbel vollkommen kreisförmig werden kann, sondern elliptische und ähnliche Formen zustande kommen müssen, das ergiebt sich von selbst daraus, dass der Wirbel nicht unabhängig ist von den Strömen, die ihn bildeten und die deshalb auch weiter auf ihn einwirken und bei wechselnder Stärke und Richtung auch die Umgrenzungsform des Trichters ändern.

Da die Innenseite des Wirbels keine Kegelfläche, sondern nach innen konvex gekrümmt ist, so ergiebt sich, dass der Abstand zwischen den einzelnen Isobaren nicht ein gleicher ist, sondern dass derselbe bei den der Trichterspitze, d. h. also dem Centrum der Cyklone näher gelegenen Isobaren ein kleinerer, oder demgemäss der Gradient ein grösserer sein muss, während gegen den oberen Rand des Trichters, also in den äusseren Regionen des Wirbels der Gradient kleiner wird: Eine Thatsache, welche bekanntlich auch fast regelmässig beobachtet wird.[135]) Das Zuströmen der äusseren Luft wird sich im weiteren Fortbestande des Wirbels also auch nach diesem Gradienten, der selbst erst durch den Wirbel geschaffen wurde, richten und wird dabei durch das Rotationsmoment zu den spiralförmigen Bahnen gezwungen. Jedoch selbst ein der Kreisform nahekommender Wirbel hat nicht in allen seinen Quadranten die gleiche Windgeschwindigkeit und den gleichen Gradienten. Es ergiebt sich das wiederum aus der Entstehung des Trichters. Dort wo die Stauung der beiden Ströme

stattfand, strömt die Luft nicht bloss infolge der daneben bestehenden Verdünnung gegen das Centrum, sondern dort wird dieser centripetale Druck noch verstärkt durch die daneben herrschende Stauung. Infolge dieser beiden gleichgerichteten Kräfte müssen also in dem der Stauung zunächst gelegenen Quadranten des Wirbels stärkere Winde und ebenso stärkere Gradienten zum Vorschein kommen, als in dem gegenüberliegenden Quadranten, wo die Luft lediglich der Anziehungskraft — wie wir es kurz nennen können — des Wirbelcentrums folgt. Aus denselben Gründen muss hier der Ablenkungswinkel zwischen Gradient und Windrichtung ein Minimum erreichen. In der That hat bereits Cl. Ley[136]) auf die stärkere Inklination der Winde und den stärkeren Gradienten im SE-Quadranten gegenüber den anderen Quadranten unserer Cyklonen hingewiesen; dieselbe Erscheinung treffen wir auch bei den Wasserwirbeln.[137]) Warum es bei den Cyklonen unserer Gegenden der SE Quadrant ist, kann erst später besprochen werden. Ein schematisches Bild einer Wirbelbildung giebt Figur 3 auf Tafel I. Dabei bedeutet die Richtung A B die Fortpflanzungsrichtung des Wirbels.

4. Nachweis der Cyklonenentstehung infolge Zusammenstoss von Winden durch die synoptischen Karten.

Wie bei den Furchen wollen wir auch bei den eigentlichen Cyklonen unsere Theorie an der Hand der synoptischen Karten prüfen. Die damaligen allgemeinen Bemerkungen seien auch hier massgebend. Chronologisch geordnet mögen folgende Wetterlagen ausgewählt werden:

20. Dezember 1880, Tafel VII. Über der Südspitze von Norwegen lagert eine Depression von 735 mm Tiefe. Das ausgedehnte Depressionsgebiet erstreckt sich über England, Mitteldeutschland, Ostsee und Bottnischen Meerbusen. Diese geschlossene Depression ist durch einen schmäleren

Streifen in Verbindung mit einer ausgedehnten Cyklone über dem nördlichen Atlantischen Ocean, deren Centrum von 740 mm ungefähr bei 47° n. Br. und 44° w. Br. v. Gr. liegt [auf der Tafel nicht mehr sichtbar]; der südliche Theil von Europa ist von hohem Druck beherrscht, der gegen das Innere von Russland und gegen Afrika sein Maximum erreicht. Ungefähr von 9° östlicher Länge an herrschen auf der Ostseite dieses Meridians südliche Winde von 46° nördlicher Breite angefangen bis zum hohen Norden, mit wenig Ablenkung selbst in der nächsten Nähe des Depressionscentrums, in Dänemark und in Christiania sind reine Südwinde von bedeutender Stärke notiert. Vom Meerbusen von Biskaya und der Nordwestküste von Spanien kommend wehen SW-Winde über das nördliche Frankreich und den Kanal, Belgien, Holland bis zur Westküste von Dänemark. Wir haben also hier 2 verschiedene, deutlich ausgeprägte Ströme, die nicht erst durch das in Norwegen lagernde Minimum erzeugt sind, da sich z. B. der Südwind bis in den höchsten Norden verfolgen lässt und dort sogar südwestliche Richtung einschlägt.

Nach der von mir vertretenen Theorie sollte nun an der Treffstelle der beiden Strömungen ein Wirbel sich ausbilden. Da jedoch bereits eine Cyklone besteht, wird sich nur ein partielles Centrum ausbilden können. Dass dies auch stattfindet, zeigt die Karte vom folgenden Tag, dem 21. Dezember 1880. Wir finden über Mecklenburg und Pommern eine geschlossene Depression von 745 mm. Am 20. Dezember herrschte dort noch ein Druck von über 750 mm. Das Centrum der Hauptdepression aber hat sich nach dem Norden der skandinavischen Halbinsel gewendet. Die übrige Druckverteilung über dem Ocean und Südeuropa hat sich wenig geändert, nur dass der niedere Druck sich tiefer nach Mitteldeutschland erstreckt. Die Fortpflanzung dieser Teildepression findet in der Resultante statt, also ungefähr gegen NNE, am 22. Dezember lagert das Centrum über dem Finnischen Meerbusen

und der hohe Druck beherrscht jetzt ganz Frankreich und Deutschland.

28. Mai 1882. Tafel VIII. Europa und der Ocean sind südlich von ca. 45° n. Br. von hohem Druck überlagert. Eine Depression von 750 mm findet sich zwischen England und Island. Amerika ist ebenfalls nur von kleinen Minimis heimgesucht. Im Norden aber herrscht hoher Druck. Ein Blick auf das beigegebene Kärtchen zeigt nun einen deutlich ausgeprägten SW Strom von der Mitte des nördlichen Atlantischen Oceans bis nach Skandinavien. Zwischen 40° und 50° westlicher Länge finden wir in mittleren Breiten einen NNW Strom. Die Bedingungen zur Entstehung einer Depression sind erfüllt und der 29. Mai zeigt ein ausgebildetes Centrum an der Stelle des Zusammentreffens beider Ströme [46° n. Br., 33 w. L.], während die andere Cyklone sich nördlich gezogen hat.

2. August 1882. Tafel IX. Die Wind- und Druckverteilung ist wieder am besten aus der Karte zu ersehen. Europa mit Ausschluss von Grossbritannien und Skandinavien steht unter hohem Druck. Auch der grösste Teil des Atlantischen Oceans ist in einem Maximalgebiet und sind nur einige seichtere Becken angedeutet. Östlich vom 41.° w. L. finden wir einen ausgeprägten breiten Südstrom. In ihn fällt, von der Lorenzostrommündung kommend, ein schmälerer W Strom ein. Die Folge ist das Entstehen einer kleinen Cyklone bei $42^1/_2{}^0$ n. Br. und 42° w. L. im Gebiete hohen Druckes, wie dies die Karte vom 3. August zeigt. Da an diesem Tage die Westwinde nur mehr sehr schwach sind, erlischt auch die Depression am nächsten Tage. Zugleich entstand am 2. August eine kleine Depression über Neufoundland, deren Ursachen jedoch wegen der im Norden fehlenden Beobachtungsdaten nicht klar vorliegen; es scheint ein Nordwind, von Grönland kommend, in den bereits erwähnten Weststrom eingedrungen zu sein.

17. Oktober 1883. Tafel X. Zwischen Island, Schottland und Norwegen liegt ein Depressionscentrum von

725 mm Tiefe. Das Depressionsgebiet ist sehr ausgedehnt. Die Isobare 760 verläuft im südlichen und östlichen Teil der Depression wie folgt: Vom Weissen Meer durch den Finnischen Meerbusen nach Königsberg i. Pr., Breslau, von hier nach Friedrichshafen, von da westlich ziemlich dem 46.° n. Br. sich anschliessend. Das östliche Russland steht unter sehr hohem Druck; ebenso der Atlantische Ocean südlich des 45.° n. Br., sowie Nordamerika.

Das oben erwähnte Minimum bringt nun starke Winde hervor und zwar wehen von Neufoundland über England bis zur Nordsee reine Westwinde, die auch noch den Kanal beherrschen. Von den Alpen aber erstreckt sich in einer bedeutenden Breite, nämlich bis ins Innere von Russland, ein Südstrom bis zum höchsten Norden. Ungefähr über Dänemark stossen der W Strom mit dem S Strom zusammen.

Dänemark liegt an diesem Tage zwischen den Isobaren 745 und 750 mm. Am 18. Oktober hat sich nun über der Insel Seeland, also wenig östlich von Dänemark ein kleines aber intensives Depressionscentrum von 735 mm entwickelt, ganz wie die Theorie es wahrscheinlich machte. Das Centrum der Hauptdepression blieb ziemlich stationär, wie dies die Tafel zeigt. Auch sonst haben sich die Druckverhältnisse in allen Gegenden wenig geändert.

17. November 1883. Tafel XI. Die Druckverteilung, sowie die Windrichtung im Norden Deutschlands ist der eben besprochenen vom 17. Oktober 1883 so ähnlich, dass eine Wiederholung unnötig erscheint.

Auch am 17. November bringt ein S Strom über Deutschland bis Schweden und ein W Strom über England, ein Teilminimum über der Nordsee hervor, wie dies aus der Karte vom 18. November ersichtlich ist.

9. Dezember 1883. Tafel XII. Über Island lagert eine Depression. Südlich von 55° n. Br. herrscht über Europa, dem Atlantischen Ocean und Amerika hoher Druck. Südlich von Neufoundland bis zu 40° n. Br. wehen S Winde.

Aus dem Innern Nordamerikas kommt südlich der Lorenzomündung ein W und NW Wind; das Resultat ist die Entstehung eines Minimums über Neufoundland. Da die betreffenden Ströme auch am 10. Dezember andauern, sogar noch deutlicher ausgeprägt sind, so erweitert sich am 11. Dezember, wenn man die betreffende Wetterkarte, die im Anhang nicht mehr beigefügt ist, nachsieht, auch die Depression, indem sich etwas südlich von Neufoundland noch zwei Depressionscentren bilden. Die Fortpflanzung ist nordöstlich.

17. Januar 1884. Tafel XIII. Über Island liegt ein nach Norden offenes Depressionscentrum, ebenso über der Südspitze von Grönland; beide sind durch eine Zunge tiefen Druck verbunden. Südlich des 50.° n. Br, herrscht über dem Ocean und Nordamerika hoher Druck, ebenso ist ganz Europa mit Einschluss von England und den Schottlands-Inseln von sehr hohem Druck überlagert.

Bereits an der Nordwestküste von Afrika beginnt nun ein südlicher Wind, der sich längs der europäischen Westküste in fast reinen S verwandelt und ganz England und die Westküste von Skandinavien beherrscht. Er dehnt sich in den Breiten von Süd-England bis zum 21.° w. L. in den Atlantischen Ocean hinein aus.

Nördlich des 41.° n. Br. finden wir, von den Canadischen Seen beginnend, einen schmalen aber reinen W Wind. Derselbe reicht bis zum 30.° w. L., wo dann allmählich der S Wind vorherrscht.

Diese beiden zusammentreffenden Ströme rufen ein Wirbelcentrum hervor und zwar ist dessen Mittelpunkt bei 50° n. Br. und $26^1/_2{}^0$ w. L., wie die Karte des folgenden Tages beweist. Die anderen Druckverhältnisse haben sich wenig geändert und sind am besten aus der Karte zu entnehmen. Das Minimum erreichte nur eine Tiefe von 755 mm. Die Fortpflanzung geschah wahrscheinlich in nordöstlicher Richtung, denn während die eingangs erwähnte Depression sich zwischen Grönland und Island gelagert hat, finden wir

am 20. Januar über den Schottlands-Inseln eine Ausbuchtung der Isobaren gegen die Nordsee zu.

3. März 1884. Tafel XIV. Zwischen Island und Grönland liegt ein Depressionscentrum, ein eben solches etwas südlich von Neufoundland.

Die Isobare 760 zieht sich vom 70.° n. Br. beginnend längs des Greenwicher-Meridians bis fast zu dieser Stadt, dann durch die Bretagne bis zur Stelle, wo der 10.° w. L. den 45.° n. Br. schneidet, und geht dann in anfangs westlicher, dann nordwestlicher und zuletzt wieder westlicher Richtung weiter, bis sie Amerika erreicht. Es befindet sich also ganz Europa mit Einschluss des Ärmelkanals, jedoch mit Ausschluss des westlichen Teiles von England unter hohem Druck, ebenso ist südlich von 40° n. Br. im Ocean hoher Druck. Es wehen nun vom Busen von Biscaya anfangend über den Nordwesten Frankreichs, den Kanal, ganz England hinweg bis nach Island sehr starke Südwinde. Vom Atlantischen Ocean nähert sich dem Ärmelkanal ein reiner starker W Strom. Es bildet sich demgemäss mit dem Centrum über Cornwallis ein intensives Teilminimum von 745 mm Tiefe. An diesem Tage finden wir aber an Stelle des W Windes einen N Wind getreten. Der Südwind in Westeuropa bleibt bestehen, aber wie ein Blick auf die Karte zeigt, konvergieren die beiden Ströme beim Kanal. Es kann also die Depression nicht bestehen bleiben, es wird nur noch nördlich davon eine Furche entstehen können, während durch Stauung an Stelle der Depression hoher Druck treten muss: Am 5. März finden wir an Stelle der Depression die Isobaren 765, während an der Ostseite von Schottland eine Zunge tiefen Druckes entstanden ist, die sich nach Norden öffnet.

28. Mai 1884. Tafel XV. Ungefähr zwischen 40° und 50° w. L. und 40° und 50° n. Br. ist eine geringe Depression gelagert. Über den übrigen Gebieten, die die Karte enthält, ist hoher Druck notiert. Zwischen 70° und 50° w. L. ist ein mächtiger Südstrom von der Nordküste

Südamerikas bis Grönland reichend notiert, von Florida kommt ein Westwind und so entsteht am 29. Mai, da wo ungefähr die Ströme sich treffen, nämlich über Korea, eine Depression.

13. Mai 1885. Tafel XVI. Über dem Atlantischen Ocean lagert hoher Druck. Gegen die Ostküste Nordamerikas weht südlich des 40.° n. Br. ein östlicher Wind, während von den westindischen Inseln ein südlicher Wind kommt. An dem Treffpunkt beider Ströme entwickelt sich eine Depression, welche auch die Karte vom 14. Mai etwas östlich von Neuyork zeigt. Man sieht an diesem Tage noch immer den südlichen Windstrom, während der östliche sich noch mehr als tags vorher nach Norden gedreht hat.

Diese beiden Karten zeigen aber auch die im früheren von uns behauptete Einwirkung der Windrichtung auf die Isobarengestaltung in sehr anschaulicher Weise. Wir sahen soeben, dass am 13. Mai ein S Wind herrscht, östlich dieses Südstromes in gleichen Breiten finden wir einen Nordstrom durch mehrere Beobachtungsorte notiert. Der 62.° w. L. bildet ungefähr die Grenze beider Ströme. Dieser Nordstrom befindet sich in einem Gebiet hohen Druckes, das ca. bis 67° w. L. reicht. Das Nebeneinanderwehen dieser antiparallelen Ströme muss jedoch eine Verschiebung des Gebietes hohen Druckes zur Folge haben, indem sich zwischen beiden Strömen eine Furche tieferen Druckes auszubilden strebt. Am 14. Mai finden wir auch den hohen Druck durch einen schmalen Streifen tieferen Druckes verdrängt. Diese Änderung der Isobaren infolge des Nebeneinanderbestehens verschiedener Winde tritt regelmässig ein, ist jedoch meist nicht so leicht als Ursache und Wirkung auseinanderzuhalten, wie in vorliegendem Beispiel.

16. Juni 1885. Tafel XVII. Über Schweden lagert eine Depression. Über Schottland, ebenso über der Normandie, Pikardie, Belgien lagert ein kleineres Maximalgebiet. Island liegt im Gebiete einer Depression, südlich

davon ist jedoch der an Europa angrenzende Teil des Atlantischen Oceans von hohem Drucke beherrscht. Von der südwestlichen Spitze Schottlands über Irland, Irische See, St. Georgs-Kanal, Westküste Englands und von da zwischen dem 10.° und 15.° w. L. bis zur Nordküste Afrikas lässt sich ein Nordstrom verfolgen. Durch den Ärmelkanal dagegen kommt ein Ostwind. Beide treffen sich also ungefähr über der Bretagne. Am 17. Juni finden wir auch über der Nordküste Frankreichs eine Depression und die beiden Hauptströme des Vortages lassen sich auch jetzt fast noch deutlicher als vorher aus der Karte ersehen, nur dass der Nordstrom sich noch weiter nach Osten verbreitert hat und demgemäss auch die Druckverteilung des Vortages nach Osten vorgerückt ist.

18. September 1885. Tafel XVIII. Südlich von Grönland ist eine intensive Depression, die ostwärts weiter schreitet und am 19. September mit dem Centrum zwischen Island und Schottland sich findet. Den übrigen auf der Karte des 18. September sichtbaren Teil des Atlantischen Oceans bedeckt ein intensives Maximum. In dem von Südwest nach NE gerichteten Streifen, der das Depressionsgebiet von dem südlich gelegenen Maximalgebiete trennt, ist ein heftiger SW Strom notiert, der gegen England zu in einen S Strom umbiegt. Dieser SW Strom beginnt aber bereits im Maximalgebiet mit derselben Stärke als in grösserer Nähe der Depression, so dass er als selbständiger Strom angesehen werden muss, der erst in grösserer Nähe der Depression sich in das cyklonale Windsystem einfügt. Von Labrador her kommt ein NW Strom, durch die Cyklone hervorgerufen, aber er biegt nicht in den SW um, sondern die Schiffe D 35, S 35, S 45, S 44 etc. notieren noch denselben Wind, und die westlich davon befindlichen Schiffe sogar einen starken Nordwind, was wiederum zeigt, dass auch dieser Wind nur teilweise zum cyklonalen System der Cyklone über der Südspitze von Grönland gehört. Die beiden Ströme NW und SW treffen sich demnach unge-

fähr in dem Rechteck, das gebildet wird durch die grössten Kreise 30° und 40° w. L. und 45° und 50° n. Br. Am 19. September ist an dieser Stelle auch eine geschlossene Depression zustande gekommen, die von dem grossen Depressionsgebiet weit entfernt ist, wenn auch die Isobare 760 beide umschliesst. Am 19. September lassen sich der SW Strom, trotz der jetzt weiter entfernten grossen Cyklone noch ganz unzweifelhaft feststellen, der Nordweststrom dagegen hat sich nach W gedreht.

23. Februar 1886. Tafel XIX. Europa, ebenso der Atlantische Ocean südlich des 35. Breitegrades ist von Gebieten sehr hohen Druckes überlagert. Das Centrum des europäischen Maximums (785 mm) lagert über Lappland. Den übrigen zwischen Europa und Nordamerika liegenden auf der Karte sichtbaren Teil des Atlantischen Oceans bedeckt niederer Druck. Wir finden auf der Karte vom 23. Februar zwischen Europa und Nordamerika auf dem Ocean die geschlossene Isobare 760 und innerhalb derselben zwischen dem 40.° und 50.° w. L. ist der tiefste Druck mit 750 mm notiert. Obwohl der grössere Raum, den die Isobare 760 einschliesst, keinen Mangel an Beobachtungsstationen hat, notiert kein Schiff einen tieferen Barometerstand, so dass ausser dem erwähnten kleinen Depressionscentrum kein weiteres vorhanden ist. Vom Schnittpunkt des 35.° w. L. mit 50° n. Br. ausgehend lässt sich bis gegen die Nordwestküste Afrikas ein NW Strom verfolgen. Westlich dieses Stromes finden wir Nordwinde, so dass also über diesem Teil des Oceans ein mächtiger breiter nördlicher Strom herrscht. Vom europäischen Kontinent her kommt ein Oststrom. Derselbe findet sich nicht nur an den Westküsten von England und Frankreich, sondern weit ins Land hinein. Dänemark, Finnland etc. melden noch einen östlichen Wind. Die Karte zeigt am besten, dass in ganz Europa vorwiegend östliche Winde notiert sind. Auf dem Ocean stossen der Nordstrom und der Oststrom zusammen und am 24. Februar ist an dieser Stelle

eine grosse sehr regelmässige Cyklone mit einer Tiefe von 740 mm zu finden. Die Karte erläutert am besten, dass die neuentstandene Cyklone genau da sich befindet, wo die Ströme zusammen kamen und dass die Cyklone vorher in keiner Weise angedeutet war, denn die kleine Depression, die tags vorher in der Nähe war, ist nicht als identisch damit anzusehen, das zeigt ein Blick auf die ganze Wetterlage. Zudem ist am 24. Februar östlich der grossen Cyklone auf dem Ocean noch eine kleinere Cyklone mit 755 mm Tiefe entstanden, die sich ebenfalls auf den Konflikt jener beiden grossen Ströme zurückführen lässt.

17. April 1886. Tafel XX. Inmitten des auf der Karte erscheinenden Teiles des Atlantischen Oceans findet man die symmetrisch zum 40.° w. L. liegende geschlossene Isobare 760 auf drei Seiten von der Isobare 765 umschlossen. Ein tieferer Barometerstand ist in dem betreffenden Gebiete noch nicht notiert. Auf der westlichen Seite des von der Isobare 760 umschlossenen Gebietes herrscht ein Nordstrom der in südlicheren Breiten in einen NW umbiegt. Das Schiff D 29 [28° w. L., 24° n. Br.] notiert noch NW. Man vergleiche noch die Beobachtungen der Schiffe D 8, S 29, D 24, S 39 [alle in der Nähe des 50.° w. L., 40.° n. Br.], woraus hervorgeht, dass nicht etwa die im Innern der Isobare 760 etwa angedeutete jedenfalls sehr geringe Depression Ursache dieses Windstromes ist, sondern dass dieser Strom unabhängig davon ist.

Zwischen dem 42.° n. Br. und 50.° n. Br. kommt von Europa ein östlicher Strom. Da wo der Oststrom mit dem Nordstrom zusammenstosst, finden wir auch in diesem Fall am 18. April eine ausgebildete Depression symmetrisch zum 40.° w. L. gelegen. Wenn auch diese Depression am Vortage bereits angedeutet war, so wird man doch den Einfluss der beiden Ströme auf die Ausbildung der Depression ersehen, um so mehr, als die beiden Ströme bereits am 17. April ausgebildet vorhanden waren und die Karte

vom 17., also schon einen Teil der Wirkung des Zusammenstosses andeuten muss.

22. August 1886. Tafel XXI. Über dem auf der Karte sichtbaren Teil des Atlantischen Oceans liegt ein Maximum, ein Ausläufer erstreckt sich bei Neuyork noch auf das Festland. Zu beiden Seiten des 60.° w. L. findet man einen SE Strom [vergleiche die Beobachtungen der Schiffe S 149, D 77, D 60, D 13]. Zwischen 40° und 43° n. Br. wird an der Nordwestküste der Vereinigten Staaten NE Wind gemeldet. Beide treffen sich an der nordamerikanischen Küste ungefähr in der Breite von Neuyork. Am 23. August ist dortselbst eine kleine kreisförmige Cyklone mit 750 mm Tiefe zu finden, an der Stelle, wo tags vorher noch hoher Druck lagerte.

26. Oktober 1886. Tafel XXII. Der Norden Europas wird von einem Maximalgebiete eingenommen. Von Schottland beginnend herrscht längs der Westküste des Kontinents und auch im angrenzenden Ocean bis an die Nordwestküste Afrikas ein Nordoststrom, der in südlichen Breiten in NW umbiegt. Längs des 50.° n. Br. kommt aus dem Innern Russlands ein Oststrom, der seine grösste Stärke im Ärmelkanal entfaltet. Über der nordwestlichen Spitze von Frankreich stossen beide Ströme zusammen. Am 27. Oktober lagert auch an der Westküste von Frankreich eine ausgebildete Depression, die tags vorher noch nicht angedeutet war, trotz des dichten Netzes von Beobachtungsstationen.

Über Spanien und westlich von Sardinien sind durch den Zusammenstoss verschiedener Winde ebenfalls zwei kleinere Depressionen aufgetreten, auch hier lässt sich eine Süd- und eine Westströmung nachweisen, wenn auch nicht so leicht wie oben.

Diese wenigen Fälle mögen genügen, um darzuthun, dass die synoptischen Karten thatsächlich den Beweis liefern, dass durch das Zusammentreffen verschiedener Windströme Depressionen sich ausbilden, wenn man nur die

allgemeinen Windbahnen von denen zu sondern weiss, welche durch die lokale Einwirkung benachbarter Druckverhältnisse entstehen und welch letztere Strömungen das Bild sehr kompliziert machen können, jedoch selten imstande sind, die grossen Windbahnen unkenntlich zu machen. Die Cyklonen sind Teile der allgemeinen Luftcirkulation und können ihre Ursachen nur dann sich zeigen, wenn man die Beobachtungen eines möglichst grossen Raumes auf die im grossen und ganzen übereinstimmende Windrichtung prüft, welche in ununterbrochener Folge einen Strom des Luftmeeres darstellen kann. Mit anderen Worten, man muss die grossen Windbahnen als das Primäre ansehen, und nicht jeden Windstrom als durch eine weit entfernte Cyklone hervorgerufen betrachten; denn die Cyklonen sind sekundäre Erscheinungen hervorgerufen durch das Bestehen und Ineinanderfliessen der grossen Strömungen des Luftmeeres.[138])

Der Vollständigkeit halber sei noch daran erinnert, dass kleinere Wirbel auch zwischen parallelen Strömen entstehen können, wie dies die Experimente zeigten. Meistens kommen aber da Furchen zum Vorschein.

Kommt endlich ein Strom an einem Gebiet vorbei, wo die Luft ruhig ist, so entstehen Wirbel, wie wir dies auch bei der Donau beobachteten. Zwischen zwei Depressionen nun ist bekanntlich die Luft immer in relativer Ruhe,[139]) weht also da ein starker Windstrom vorbei, so kann er Anlass geben zur Ausbildung eines neuen Wirbels zwischen den beiden anderen.

Die Wetterlage auf Tafel XXIII. giebt ein Beispiel hierzu. Am 28. Januar 1881 ist der auf der Karte sichtbare Teil des Atlantischen Oceans von einem grossen Depressionsgebiet überdeckt. Dasselbe hat zwei grosse Centren, das eine über Neufoundland, das andere zwischen dem 30. und 20.° w. L. Zwischen beiden ist kein weiteres Centrum eingetragen. Am ganzen Südrand des grossen Depressionsgebietes, längs 40° n. Br. herrscht ein sehr hef-

tiger Weststrom. Dieser Strom ruft denn auch in dem Gebiete zwischen den beiden Depressionscentren, wo nur schwächere Winde wehten, ein neues Centrum hervor, wie es die Karte vom 29. Januar zeigt.

Also auch hier finden wir die beim Wasser vorkommenden Erscheinungen bestätigt.

5. Luftbewegung im Innern des Wirbels.

Bei Betrachtung der Luftbewegung eines cyklonalen Systems sind vier Regionen zu unterscheiden. Die Bewegung der Luft im Innern des Wirbels, der Luft aussen, die dem Wirbel zuströmt, und der Luft oberhalb und unterhalb des Trichters.

Da ein aufsteigender oder absteigender Luftstrom nicht Ursache der Cyklonen ist, sondern lediglich der Zusammenstoss zweier Ströme, so kann im Centrum der entstehenden Luftverdünnung — im Innenraum des Trichters — keine andere als horizontale Luftbewegung zunächst zum Vorschein kommen. Die im Innenraum des sich ja in jedem Augenblick neubildenden Wirbels, wie wir dies gelegentlich der Fortpflanzung besprechen werden, befindliche Luft erhält von den die Wände des Trichters umkreisenden Luftteilchen Impulse nach den verschiedensten Richtungen, nimmt aber nicht selbst an der wirbelbildenden Bewegung teil; die Wandungen des Trichters sind ja gegenüber der Aussen- und Innenluft gleichsam als starr anzusehen. Diese verschiedenen auf die Innenluft einwirkenden Impulse nebst der bereits vorhandenen horizontalen Geschwindigkeitskomponente entsprechend der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Cyklone, welche ja meist nur einem mässigen Wind entspricht, können sich gegenseitig aufheben und so im Innern einer Cyklone die bekannte Windstille schaffen, welche um so mehr auffällt, je energischer die Wirbelbewegung ist. Übrigens da der Wirbel durch den Zusammenstoss von Strömen entsteht, so findet

eine Stauung statt und muss deshalb die Luft dort, wo der Wirbel sich ausbildet, stagnierend sein; wird der Wirbel später ohne Neubildung bloss mehr fortgetragen, so ist auch die Windstille im Centrum nicht mehr ausgeprägt.

Der Einwand Mohns,[140]) dass nur durch die Annahme aufsteigender Ströme im Innern des Trichters die Windstille sich erklären lasse, dürfte auch noch weiters dadurch widerlegt sein, dass ja auch der aufsteigende Strom eine horizontale Geschwindigkeitkomponente besitzt, denn sonst käme der Wirbel nicht von der Stelle, also gerade nach der physikalischen Theorie müssten die im Innern des Trichters herrschenden Winde der Fortpflanzungsgeschwindigkeit desselben entsprechen. Man vergleiche auch unsere früheren Ausführungen über die Axe eines Wirbels hiermit.[141])

Sind die zwei zusammenstossenden Ströme nicht beide horizontal, sondern gegen den Horizont geneigt, z. B. wenn ein oberer Strom sich neben einen unteren einzwängt, — so wird auch im Innenraum die vertikale Bewegungskomponente sich geltend machen, grosse auf- oder absteigende Ströme kommen jedoch da nie zum Vorschein. An den sogenannten Wänden des Trichters ist wie bei den Wasserwirbeln die Bewegung der Luft eine abwärtsstrebende, doch kommt dabei nicht etwa jedes Teilchen von oben bis unten, sondern wie früher bemerkt, haben wir die Bewegungen der Teilchen mit einer wellenförmigen sich fortpflanzenden zu vergleichen. In der äusseren Umgebung der Cyklone neigen sich, wie dies auch die Wasserwirbel analog zeigen, die Isobarenflächen gegen das Centrum und verfolgen die Winde spiralförmig nach abwärts gehende Bahnen.

Der Wirbel ist jedoch keine im ganzen rotierende Luftmasse.

Er ist nicht, wie Mohn[140]) und auch Hann[142]) zu glauben scheint, eine Art von Kreisel, der immer von denselben Teilen gebildet wird, sondern besteht in seinem

Fortschreiten aus immer anderen und anderen Luftteilchen, die sich in der Bewegung gegenseitig ablösen.

Deshalb kann man auch nicht sagen, dass diese absteigende Wirbelbewegung eine merkbare Temperatursteigerung hervorbringen müsste. Die allmählich abwärts geschaffte Luft [allmählich, weil der Einfluss der Schwere gegenüber den Wasserwirbeln nur gering ist] tritt unten aus dem Wirbel aus. Ist die Wirbelbewegung nicht mehr energisch genug, diese Abfuhr zu ermöglichen, so muss sich der Trichter allmählich ausfüllen, indem die im Centrum befindliche Luft ihre ursprüngliche Dichte wieder erlangt durch den Zuwachs der stagnierenden Luft: die Cyklone erlischt.

Reicht die Cyklone nicht bis zum Erdboden herab, so wird die darunter befindliche Luft einen Auftrieb erfahren: die bekannte Saugwirkung der Cyklone.

Die Luft, die oberhalb der Cyklone ist, strebt, wie früher erwähnt, den Centralraum der Cyklone auszufüllen, woran sie jedoch die fortwährende Neubildung von unten hindert und sich so nur eine kleine absteigende wellenförmige Bewegung ausbildet.

6. Intensität der Cyklonen.

Bereits die Experimente zeigten, dass ausser dem Winkel, unter dem sich die beiden Strahlen trafen, auch noch deren Stärke einen Einfluss auf die Intensität des Wirbels äussert. Ebenso bei der Luft: die Cyklonen werden um so heftiger, je mächtiger die beiden Ströme sind, je näher sie rechtwinkelig aufeinanderprallen (bei Parallelismus fanden wir deshalb auch bloss seichte Furchen). Deshalb entstehen auch heftige Cyklonen oft so unvermutet, indem plötzlich ein anders gerichteter Strom in den bisher herrschenden einbricht. Je langsamer ein Strom sich neben einem anderen Bahn bricht, desto geringer ist die Intensität der

entstehenden Wirbel, es kommen nur flache Depressionen zum Vorschein.

Je stärker die beiden ursprünglichen Ströme, desto grösser die entstehende Stauung, also auch die daneben befindliche Luftverdünnung, somit desto intensiver die sich einleitende Wirbelbewegung.

Die zustande kommende Barometerdepression erklärt sich folgendermassen: Bei den Wasserwirbeln ist die Verdünnung eine vollkommene, d. h. es ist im Innenraum des Wirbels kein Wasser, sondern Luft, demgemäss würde im Innenraum auch kein hydrostatischer Druck herrschen.

Bei den Luftwirbeln ist die Sache etwas anders. Abstrakt müsste im Innern die Verdünnung auch so gross sein, dass am Boden der Luftdruck Null herrscht. Bekanntlich aber ist die Barometererniedrigung im Centrum selten mehr als 50 mm unter dem Mittel. Nähme man nun an, die Wirbel entstehen durch die oberen Luftströme und erstreckten sich — zur Erklärung der Cyklonenkalme — bis zur Erdoberfläche,[143]) so müsste doch ein bedeutend niedrigerer Barometerstand eintreten, als beobachtet wird. Nimmt man dagegen mit uns an, dass die Mehrzahl aller Cyklonen ihren Ursprung dem Zusammenstoss der unteren Luftströme verdankt, so ergeben sich andere Resultate. Die Cyklone kann sich nicht in grössere Höhe erstrecken, als die sie bildenden Ströme. Bekanntlich wird von Redfield[144]) als mittlere Höhe unserer Cyklonen ca. 1500 m angenommen. Es werde nun durch den Zusammenstoss der Winde zunächst ein völlig luftleerer — nicht bloss luftverdünnter — Raum geschaffen, der sich also von der Erdoberfläche bis zu 1500 m Höhe — trichterförmig sich erweiternd — erstreckt. Wir beobachten dann im Centrum des Trichters auf der Erdoberfläche lediglich den Druck, der über der Cyklone herrscht; vorausgesetzt, dass der Druck der oberen Luft sich durch den leeren Raum fortpflanzt und die obere Luft abgeschieden sei. Herrscht nun vor Bildung des luftleeren Raumes an der Erdoberfläche

ein Druck P von 760 mm, so wird nach Bildung des luftleeren Trichters bis zur Höhe h = 1500 m hinauf der Druck x der darüber befindlichen Luft sich aus der Höhenformel $h = 18401 \log \frac{P}{x}$ berechnen. Hieraus ist $\log x = \frac{18401 \log 760 - 1500}{18401}$ und x = 629,95 mm.

Die Luft mit diesem Druck sinkt also in den leeren Raum. Da jedoch durch den Zusammenstoss lediglich ein luftverdünnter Raum geschaffen wurde, so kommt hierzu noch der Druck dieser verdünnten Luft von 1500 m Höhe. Beträgt die Dichte die Hälfte der normalen Dichte (760 mm), so ist ihr Druck: $\frac{760 - 629,95}{2} = \frac{130,05}{2} = 65,02$ mm, also der Barometerstand im Wirbelcentrum (629,95 + 65,02) mm = 694,97 mm, was von der Wirklichkeit nicht zu entfernt liegt, um so mehr, als durch das Nachsinken der oberen Luft in das Vakuum, über der oberen Luft eine Schichte von 1500 m durch die seitliche allerdings sehr leichte Luft oben ersetzt, weil wieder gleiche Niveauhöhe sich herstellt. Zugleich zeigt sich, dass in je grössere Höhen sich die Cyklone erstreckt, desto geringer ihr Barometerstand wird. Die Ausfüllung des luftverdünnten Raumes mit der oberhalb der Cyklone befindlichen Luft geht aber in Wirklichkeit nicht so rasch vor sich, als es im idealen Falle sein könnte und deshalb ist die Berechnung des Druckes im Innern nur eine annäherungsweise.

Die grössere Intensität der Cyklonen im Winter[145]) erklärt sich aus der grösseren Stärke der zusammenstossenden Ströme im Winter, ausserdem kommt noch dazu, dass die Luft im Winter sich kontrahiert, einen stärkeren Druck ausübt, weshalb die Wirbelbildung energischer wird. Der Winter unterscheidet sich vom Sommer dadurch, dass die untere Luft dichter ist, oben ist kein solcher Unterschied, also muss es dieser Vorgang in den unteren Schichten sein, der die grössere Häufigkeit der Cyklonen bedingt.

7. Äussere Form der Cyklonen.

Die strenge Scheidung zwischen Furchen und Cyklonen erleichtert die Besprechung der Form der letzteren. Die durch Zusammenstoss entstehenden Wirbel werden sich der kreisähnlichen Form um so mehr anschliessen, als der Winkel zwischen beiden Strömen sich einem Rechten nähert. Da dabei zugleich die grösste Intensität des Wirbels stattfindet, so ist ein Beweis für obige Behauptung, dass die stärksten Cyklonen, wie sie in den Tropen und auch bei uns vorkommen, eine Kreisform haben, wie ja bekannt.[146]) Je stärker die Ströme, desto kleiner der Umfang der Cyklonen, aber desto grösser die Tiefe; je schwächer die beiden Ströme, desto grösser der Umfang, aber um so geringer an Tiefe.

Die Höhe der Cyklonen haben wir teilweise schon besprochen, die Annahme der unteren Luftschichten als Träger und Veranlasser der Cyklonen bedingt jene thatsächlich überall gefundenen Resultate der meist geringen vertikalen Erstreckung der Cyklonen im Verhältnis zum Umfang,[147]) da die Cyklone sich nicht höher erstrecken kann, als die bildenden Ströme selbst.

8. Deformationen der Cyklonen und Teilminima.

Dass die Furchen nicht, wie meist angenommen, deformierte Cyklonen seien, ist bereits besprochen. Es kann jedoch eine Cyklone bei ihrem Fortschreiten eine Furchenähnlichkeit bekommen, wenn sie auf ihrem Weg in ein Gebiet zweier paralleler Ströme eintritt. Diese deformierte Cyklone behält dann aber ihre bedeutende Tiefe bei, auch bleiben ihre Isobaren mehr konzentrisch, während dieses bei der Furche nicht der Fall ist. Weitere Deformationen können durch terrestische Hindernisse entstehen und haben wir darauf das Lostrennen einzelner äusserer Teile der

Cyklonen an Gebirgen zurückzuführen,[118]) was wieder nur möglich ist, wenn untere Strömungen die Ursache sind. Die am häufigsten vorkommenden Deformationen bestehender Cyklonen sind die sogenannten Teilminima und Ausläufer niederen Druckes. Dieselben bilden sich immer in der äusseren Umgebung der Cyklone aus, und haben wir bereits bei Besprechung der beigegebenen Wetterkarten gezeigt, dass auch sie auf den Konflikt von Strömungen zurückführbar sind. Ihre Erklärung dürfte vielleicht folgende sein: Kommt ein ausgebildeter Wirbel mit dem zu ihm direkt gehörigen Windsystem an einem Gebiete vorüber, aus welchem etwa ein Druckwind ausströmt, so wird dieser Druckwind mit den Winden des Wirbels zusammentreffen und je nach dem Winkel, den er mit ihnen macht, einen neuen Wirbel oder ein furchenähnliches Gebilde zu veranlassen suchen. Dasselbe Zusammentreffen von Winden kann aber auch unter den zum Wirbel selbst gehörigen Winden vorkommen, wenn nämlich der dem Centrum zuströmende Wind durch Hindernisse aufgehalten oder abgelenkt wird, so dass er mit den neben ihm fliessenden nicht abgelenkten Winden nicht parallele Bahnen verfolgt, sondern mit ihnen zusammenprallt. Dass diese Neubildungen immer am Rande des Wirbels entstehen, folgt eben daraus, dass ein Zusammenstoss der Winde nur solange möglich ist, als die anziehende Kraft des Centralraumes noch nicht stark genug ist, alle zufliessenden Ströme in einander parallele Spiralen einzuzwängen. Sind die Winde einmal dem Centrum nahe, so gehören sie dem Wirbel bereits an und können sich nicht selbst kreuzen.

Diese Deformationen hängen aufs engste mit der eingangs besprochenen Umbildung der Isobaren durch die Luftströme selbst (Abhängigkeit von Luftdruck und Wind) zusammen, worauf verwiesen sein möge.

Beispiele für die Bildung von Teilminima geben die bereits früher besprochenen Karten und findet man leicht selbst die einschlägigen Fälle.

So zeigt z. B. Tafel XXIV die Wetterlage vom 28. Februar 1886. Über dem Atlantischen Ocean lagert eine grosse Depression, die einen Ausläufer gegen England zu hat. Längs der Westküste des europäischen Continents herrscht ein S Strom bis nach Schottland hinauf. Vom Ocean strebt gegen den Busen von Biscaya ein SW Strom. Die Folge ist, dass sich der Ausläufer tiefen Druckes zu einem mit der grossen Depression zusammenhängenden Teilminimum mit dem Centrum südlich von Irland ausbildet, wo tags vorher noch hoher Druck (765 mm) lagerte.

Die öfter beobachtete Erscheinung, dass Cyklonen mit zwei Centren sich bilden, lässt sich durch verschieden gerichtete Strömungen auf ähnliche Weise erklären und hat auch das früher sub 2, pag. 28 angeführte Experiment diese Erscheinung gezeigt. Dass sich beide Wirbel dann um einen gemeinsamen Schwerpunkt drehen, hat sowohl unser Experiment gezeigt, als es auch theoretisch von v. Helmholtz[149]) begründet wird.

9. Erlöschen der Cyklonen.

Bis jetzt wurde das Verschwinden der Cyklonen lediglich der Erlahmung der Wirbelkraft, sei es infolge der Reibung, sei es infolge des Ausbleibens neuer Energiezufuhr zugeschrieben.

Natürlich besteht diese Ansicht auch bei der Entstehung der Wirbel auf mechanischem Weg zu Recht; nur möchte ich auf einen weiteren Grund hinweisen, der wiederum aus der Analogie der Wasserwirbel folgt. Kommen Wasserwirbel auf ihrer Bahn in Strömungen, die einen der Rotation des Wirbels entgegengesetzten Sinn hervorbringen würden, so verschwinden die vorher noch sehr intensiven Wirbel ganz plötzlich. Wäre nämlich nur die Erlahmung der Wirbelkraft die Auflösungsursache, so müssten die Cyklone allmählich an Tiefe abnehmen und endlich erlöschen, wie das ja meist beobachtet wird. Das

allerdings seltenere aber um so rätselhaftere Verschwinden einer noch vollkommenen lebensfähigen Cyklone dürfte daher gleichsam die Folge einer Abwickelung des Wirbels in entgegengesetztem Sinne sein.[150])

Darauf liesse sich z. B. das bekannte plötzliche Erlöschen der Cyklonen der Bai von Bengalen am Garro-Hills Gebirge zurückführen,[151]) indem der Landwind, resp. Druckwind eine entgegengesetzte Drehung veranlasst. Die Auflösung auf Reibung zurückzuführen, wie dies Elliot[152]) thut, dürfte inkonsequent sein, da doch viele Cyklonen über gebirgige Gegenden ziehen, ohne aufgelöst zu werden, obwohl da dieselbe Reibung vorhanden wäre. Dabei ist die Auflösung um so rascher, je kleiner der Durchmesser des Wirbels, weil eine entgegengesetzte Drehung sich hier leichter einleitet, als bei grossen Sturmgebieten, deren Centrifugalkraft grösser ist und deshalb länger Widerstand leistet.

10. Das Buys-Ballotsche Gesetz.

Die ganze vorhergehende Abhandlung geht davon aus, dass primär zwei Strömungen vorhanden sind, die durch ihren Zusammenstoss erst die Cyklone hervorrufen.

Wie wir bei den Furchen diese sekundäre Entstehung nachwiesen, so sei auch hier daran erinnert, dass die den Wirbel erzeugenden Winde — wie dies die besprochenen Wetterkarten zur Genüge beweisen — auch noch nach Entstehung des Wirbels sich verfolgen lassen und nur die dem entstehenden Wirbel zunächst liegenden Stromteile an der eigentlichen Wirbelbewegung teilnehmen; die anderen Teile der Ströme verfolgen ihren Weg unbekümmert um den entstandenen Wirbel, der grossen allgemeinen Luftdruckverteilung sich anpassend.

Da weiters die ablenkende Kraft der Erdrotation nicht als die Ursache der Wirbelbildung angesehen wurde, da sie einen Wirbel nicht erzeugen kann, indem die auf den Breitekreisen selbst dem Wirbel zuströmende Luft über-

haupt nicht abgelenkt werden kann, wie wir früher darlegten, so müssen wir jetzt untersuchen, warum die Wirbel in unseren Gegenden dem Buys-Ballotschen Gesetze gehorchen, ohne dabei die Erdrotation zu Hilfe zu nehmen. Letztere kann den eingeleiteten Drehungssinn sehr wohl unterstützen, aber seine Ursache muss doch wohl in dem Verhältnis der beiden erzeugenden Ströme zu einander liegen.

Bei unseren Experimenten haben wir Wirbel gesehen, welche mit und gegen den Uhrzeiger rotierten; die Drehung des Wirbels erfolgte ja immer so, dass der dem Hauptstrom anliegende Teil des Wirbels tangential mit dem Hauptstrom fliesst. Bei den Winden sind nun folgende 8 Kombinationen möglich: Tafel I, Figur 6 und 7 erläutert dies: und zwar sind die Hauptströme mit dreifach gefiedertem Pfeil gezeichnet. T ist der entstehende Wirbel.

Demnach kann

	N	Hauptstrom	E	Nebenstrom,	}
	W	„	N	„	} Fig. 6
	E	„	S	„	}
	S	„	W	„	}
und	N	„	W	„	}
	W	„	S	„	} Fig. 7
	E	„	N	„	}
	S	„	E	„	} sein.

Nur die 4 ersten Kombinationen Fig. 6 a bis d entsprechen dem Buys-Ballotschen Gesetz. Es ist nun kein Zweifel, dass die ablenkende Kraft der Erdrotation die links drehende Richtung begünstigt, aber immerhin könnte in niederen Breiten die mechanische, anders drehende Kraft der Winde überwiegen. Bei Durchsicht von über 1500 Wetterkarten fand ich jedoch nie eine Wirbelentstehung, bei der die bildenden Ströme nicht den ersten 4 Kombinationen entsprochen hätte.

Es müssen also klimatische Verhältnisse das Vorherrschen dieser Winde begünstigen, so dass auf unserer Halbkugel der Zusammenstoss grösserer Luftströme nach

den Kombinationen der Fig. 7 nicht vorkommen; ähnlich wie bei der Donau verschiedene Stellen ein Präponderanz zur Entstehung von gleichdrehenden Wirbeln zeigen. Dass bei Tornados und kleineren Cyklonen auch entgegengesetzte Drehung beobachtet wird, ist bekannt,[153]) wäre die Erdrotation allein wirksam, so wäre dies nach den mathematischen Ableitungen der physikalischen Theorie unmöglich. So beobachtete ich, dass in unseren Gegenden fast regelmässig ein Südstrom Hauptstrom war, in den dann ein westlicher Wind einfiel. Das Kennzeichen des Nebenstromes ist, dass er den Hauptstrom nicht durchschneidet. Dass der Südwind meist Hauptstrom ist, ergiebt sich aus der Thatsache, dass der Äquatorialstrom stärker als der Polarstrom ist.[154]) Überhaupt vergleiche man zu dem Gesagten die Windrosen über Häufigkeit der einzelnen Ströme.[155])

Jetzt können wir auch die Erklärung abgeben, warum der SE Quadrant unserer Cyklonen die stärkeren Winde hat,[156]) indem eben an dieser Seite der Cyklone der Zusammenstoss des W Stromes mit dem S Strom erfolgt und somit an dieser Stelle die Stauung eintritt. Dass dann bei vorherrschendem Polarstrom im NW Quadrant der stärkste Wind sein müsse, wie Loomis[157]) bereits vermutet, ergiebt sich dann analog. Ebenso findet man, dass bei jenen tropischen Cyklonen Südamerikas ein E Strom Hauptstrom ist, in den ein Druckwind von den Gebirgen in Venezuela als S Wind eindringt, was also ebenfalls jenen ersten Kombinationen entspricht.

Das bekannte auf Beobachtung beruhende Dovesche Winddrehungsgesetz giebt ebenfalls einen Anhaltspunkt dafür, dass in unseren Gegenden nur linksdrehende Wirbel entstehen. Der Südwind wird allmählich vom Westwind abgelöst, also muss, da der zuerst herrschende Wind (S) immer Hauptstrom ist, den der neuentstehende Wind (W) verdrängt, die Wirbel der Kombination Nr. 4 zum Vorschein kommen. Der Weststrom wird dann vom Nordstrom abgelöst, also Kombination 2 u. s. w.

Man sieht, dass dadurch nur die Kombinationen 1—4 zum Vorschein kommen. Die Erklärung dieses Umspringens des Windes wird auch von v. Lommel[158]) durch ein Kämpfen der Winde gegeben, was unsere Behauptung, dass dann Wirbel entstehen, nur unterstützt.

Dass auf der südlichen Halbkugel die umgekehrte Drehung zustande kommen muss, ist aus den gleichen Gründen ersichtlich.

11. Das Cl. Ley-Hildebrandssonsche Schema der Cirrusbewegung.

Bekanntlich wird beobachtet, dass die oberen Strömungen über einem Depressionsgebiet sich zwar ähnlich den unteren Winden verhalten, aber mit dem Unterschied, dass bei den in Untersuchung gezogenen Minimis mit einer Fortpflanzungsrichtung von W nach E die oberen Ströme an der Rückseite ein Einströmen, an der Vorderseite jedoch ein deutliches Ausströmen erkennen lassen. Nachdem wir diese Beobachtung früher zur Widerlegung der Entstehung der Cyklonen in den oberen Regionen gebraucht haben, müssen wir sehen, ob diese Erscheinung sich durch unsere Annahme erklären lässt: Hat ein Wirbel von unten seine Rotation beginnend allmählich sich zu grösserer Höhe entwickelt, wie das früher ausgeführt, so erreicht er die untere Grenzschichte der Cirren und die obere Luft sucht allmählich in den mit verdünnter Luft ausgefüllten Innenraum des Trichters einzudringen. Der Wirbel schreitet nun von W nach E fort. Da die bei uns herrschenden oberen Strömungen zumeist eine Richtung von W nach E zeigen,[160]) so bekommen die oberen Winde also eine horizontale Komponente von W—E und eine vertikale gegen den mit verdünnter Luft erfüllten Innenraum des Trichters, es müssen also die oberen Winde an der Rückseite des Wirbels eine starke Einwärtsströmung zeigen, da ja die Axe des Trichters sich nach W zurückneigt. Anders ist das

an der Vorderseite des Wirbels. Bilden wir hier die Resultante aus den beiden Komponenten, so ergiebt sich eine Richtung nach auswärts, die jedoch nicht so gross ist, wie an der Rückseite, weil hier die beiden Komponenten nicht mehr denselben Sinn haben. Die auf Tafel I gezeichnete Figur Nr. 4 möge dies veranschaulichen. Die horizontale Komponente an der vorderen Wirbelseite veranlasst, dass die Luft vom Centrum des Wirbels hinwegstrebt. Dieses Verhältnis wird jedoch nicht nur in der reinen W—E Richtung statthaben, sondern auch die über dem NE und SE Quadranten des oberen Wirbelteiles wehende Luft wird ein solches Streben auszuströmen zeigen, nur dass sich hier die horizontale Komponente selbst wieder aus zwei Komponenten zusammensetzt. Es ist also durch die Annahme, dass der Wirbel selbst in der unteren Atmosphäre sich befindet, sogar eine Notwendigkeit, dass die oberen Ströme an der Rückseite ein Einströmen, an der Vorderseite ein Ausströmen zeigen. Zugleich bestätigt sich aber auch die von Sprung[161]) ausgesprochene Ansicht, dass die Fortpflanzung des Wirbels in der oberen Atmosphäre einer Wellenbewegung zu vergleichen ist.

Aus diesem wellenförmigen Ausfüllen des Trichters durch die oberen Ströme erklärt sich noch eine Beobachtung: Bekanntlich gehen einer Cyklone meist parallele Cirrusstreifen voran, die senkrecht zur Fortpflanzung stehen.[162]) Diese dürften dadurch entstehen, dass die von oben einfallende Luft grosse Wellen bilden muss, die sich überstürzen, wodurch, wie v. Helmholtz[163]) dies bereits diskutierte, Kondensation des Wasserdampfes eintritt, die sich in Form von Cirrusbänken zu erkennen giebt. Es wäre vielleicht eine dankenswerte Aufgabe, aus dem Abstande der Cirrusstreifen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit jener Wellen und damit der Cyklone selbst zu berechnen.

Hieraus ist also auch zu schliessen, dass jenes Einströmen der oberen Luft in den unten befindlichen Centralraum des Wirbels bei dem Fortschreiten des letzteren in Art einer

Welle geschieht, indem immer neue Luft auf der Rückseite hineinfällt und vorne ausströmt.

Diese kurzen Andeutungen mögen genügen, dass bei detailliertem Verfolgen derselben das anderen Theorien Schwierigkeit bildende Verhalten der Cirrusbewegung sich in befriedigender Weise lösen lässt, und jedenfalls nicht gegen unsere Theorie spricht.

12. Temperatur der Cyklonen.

Die im Innern der Cyklone und in ihrer Umgebung herrschende Temperatur hängt ab von der Temperatur der Ströme, welche den Wirbel bilden. Deshalb herrscht in den verschiedenen Quadranten der Cyklone nicht die gleiche Temperatur; aber auch die Temperaturverteilung in den verschiedenen Quadranten kann einmal wegen der wirbelnden Bewegung als besonders wegen der Wolkenbildung und Niederschläge nicht völlig übereinstimmen mit der Mitteltemperatur des anliegenden Stromes. Dass im Innern der Cyklone, wie die neuesten Forschungen Hanns [50]) darthun, keine positive Temperaturanomalie zu finden ist, ergiebt sich insbesondere daraus, dass die Einstrahlung durch die Wolkenbildung gehindert ist. Dass das Maximum der Temperatur bei unseren Cyklonen im SE Quadranten eintritt, ergiebt sich nach den Ausführungen über das Buys-Ballottsche Gesetz aus der Stauung des warmen Südstromes und der hinzukommenden Kompressionswärme.

Die Temperaturabnahme mit der Höhe wird keine besondere Anomalie zeigen können, weil im Innern des Wirbels ruhige Luft ist, die aus einem der Ströme stammend nur etwas verdünnt ist. Ausserdem sinkt kalte Luft von oben nach, und so ist es ganz erklärlich, dass in der Cyklone kein Temperaturüberschuss über die Umgebung vorhanden ist.

13. Örtliche Lage der Cyklone zur Anticyklone.

Die sogenannten Furchen liegen zwischen zwei Maximis, eine Thatsache, die Hann bereits beobachtet hat und die er nur durch Vertauschung von Ursache und Wirkung als günstige Bedingung für die Entstehung einer Cyklone nimmt.[164])

Die Ansicht, dass die Maxima lediglich nur in Begleitung der Cyklonen auftreten, wird zwar noch vielfach festgehalten, eben aus dem Grunde, wie man die Maxima erklärt, aber es weist bereits v. Bebber[165]) auf diese Unrichtigkeit hin und dann erklären sich die grossen asiatischen und amerikanischen Maxima nicht durch die paar Cyklonen in der Nachbarschaft. Wenn also auch der Satz nicht umgekehrt werden darf, so ist doch so viel sicher, dass eine Cyklone meist von einem Maximum begleitet ist. Dabei ist beobachtet, dass sich in den weitaus meisten Fällen das Maximalgebiet zur rechten Seite der Cyklone befindet.[166]) Es geht dieser Zusammenhang unmittelbar aus unseren Entwickelungen hervor, denn einerseits haben wir die Entstehung der Maxima durch Stauung nachgewiesen, andererseits findet diese Stauung aber gerade immer zur rechten Seite des entstehenden Wirbels statt, wenn man sich unseres Schemas der Stromkombinationen zur Erklärung des Buys-Ballotschen Gesetzes erinnert. Dazu begünstigen die im Gebiete, wo die Stauung stattfindet, entstehenden Niederschläge die Erhöhung des Druckes infolge der dort eintretenden Abkühlung.

14. Niederschlag und Bewölkung.

Aus der ganzen Anordnung vorliegender Theorie lässt sich vermuten, dass wir zur Erklärung der Entstehung des Niederschlages vorzugsweise die Mischung verschiedener Luftmassen verwerten. Es ist den neueren Theorien dieser

Entstehungsweise scharf entgegengetreten worden, ja von manchen sogar überhaupt die Möglichkeit des Zustandekommens von Regen durch Mischung geleugnet worden.[167])

Hierbei scheint doch übersehen zu werden, welch grosse Mengen Luft in kurzer Zeit zur Berührung gelangen, denn man hat ja nicht ein abgeschlossenes Volumen Luft, sondern stetig fortfliessende Ströme, an deren Berührungsflächen die Mischung vor sich geht. Es hat ja besonders v. Helmholtz[163]) diese Diskontinuitätsflächen näher untersucht und bemerkt, dass ein Zeichen derselben, die vorhandenen parallelen Cirrusbänke seien und die Regenschauer.

Eine kurze Rechnung wird dazu dienen, die Mischungsverhältnisse darzuthun: Nehmen wir an, es herrsche eine Temperaturdifferenz der beiden sich mischenden Ströme von nur 5° C. — meist wird, um Niederschlag zu erhalten, wenigstens 25° gefordert;[168]) — z. B. ein Strom habe 15°, der andere 20° C. Es kann bei 15° C. ein kbm Luft 12,6 gr, bei 20° C. 17,0 gr Wasserdampf enthalten.

Bei einer Mischungstemperatur von 17,5° (mit geringer Vernachlässigung) enthielten also 2 kbm 29,6 gr Wasserdampf.

Bei 17,5° können jedoch 2 kbm höchstens 2 × 14,5 gr = 29,0 gr Wasserdampf enthalten, es kommen also 0,6 gr zur Ausscheidung, eine nicht unbedeutende Menge.

Die Niederschlagsentstehung durch Mischung feuchter Luftströme wird auch von S. Symons[169]) vertreten.

Meist wird der Einwand gemacht, die Mischungstemperatur sei falsch, da man die freiwerdende latente Wärme in Betracht ziehen müsse. Dem ist zu entgegnen: Wenn zwei feuchte Ströme zusammenkommen, so wird es unmöglich sein, dass das Wasser als Dunst in der Luft bleibt. Wird durch Niederschlag des Dampfes Wärme frei, so kann dies nie so weit gehen, dass das gesamte Wasser sich wieder in Dampf verwandelt, denn sonst würde da wieder Wärme latent, und wenn alles Wasser verdampft würde, so müsste man wieder die ursprüngliche Luft bekommen,

die mehr Wasser hat, als sie aufnehmen kann. Das Resultat ist vielmehr, dass infolge Freiwerdens von latenter Wärme ein Teil des ausgeschiedenen Wassers allerdings wieder verdampft, der andere Teil aber bleibt ausgeschieden und fällt herab.

Um nun auf die aufsteigenden Luftströme als notwendigsten Faktor jeder Cyklone nicht verzichten zu müssen, wird die durch Mischung entstehende geringe Menge des Niederschlages, der fast jede Cyklone charakterisiert, hervorgehoben. Dem ist aber anders. Die Menge des Niederschlages durch Mischung hängt nicht, wie man das bisher betonte, so sehr von der Temperatur der Ströme, als von dem Mengenverhältnisse derselben ab. Nimmt man im obigen Beispiel an, es mischen sich 5 kbm gesättigte Luft von 15° C. mit 2 kbm solcher von 20°, so kommt bei einer Mitteltemperatur von 16,4° C. $[(5 \cdot 12{,}6 + 2 \cdot 17{,}6) - 7 \cdot 13{,}2]$ gr = 4,6 gr Wasser zur Ausscheidung; das ist also das $7^1/_2$fache von jener Menge, die bei gleichen Massen ausgeschieden wurde. Ähnliche günstige Verhältnisse lassen sich auch bei anderen Kombinationen finden, und wir haben dabei gewiss einen sehr geringen Temperaturunterschied angenommen, der noch oft in der Natur überstiegen werden mag. In der bereits citierten Abhandlung von Pernter[168]) findet sich folgendes Schlussresultat: „Für einen Niederschlag von 1 mm Höhe in sehr kurzer Zeit müsste sich also mindestens eine Schichte von 6850 m Höhe pro □m mischen und zwar mit der Temperatur von 25°, resp. 0°." Das wäre nun sehr wenig und deshalb zieht Pernter auch in Zweifel, ob durch Mischung überhaupt Niederschlag entsteht.

Demgegenüber stelle ich folgende Betrachtung:

Es herrscht eine mittlere Windgeschwindigkeit von nur 6 m pro 1''; die Höhe beider Ströme betrage nur 3000 m, so kommen über jeden Quadratmeter Bodenfläche in der Sekunde 18,000 cbm zur Mischung. Dadurch erhalten wir beinahe das 3fache von Pernters Resultat und nehmen wir dazu an, die Ströme haben ungleiche Geschwindigkeit,

so kommen die vorhin ausgeführten Mischungsverhältnisse leicht zustande und erhält man also das 21fache, d. i. 21 mm pro Sekunde, das dürfte, wenn auch Verluste durch die latente Wärme stattfinden, genügend sein, um ergiebige Niederschläge zu erklären. Es besteht aber gewiss eine Berechtigung zur Annahme, dass sich die Ströme nicht in gleichen Mengen mischen, und sind, wie v. Lommel[170]) bemerkt, die Südwinde meist stärkere, als die Nordwinde, so giebt das für unsere Cyklonen nur noch günstigere Resultate, infolge des grösseren Feuchtigkeitsgehaltes der Südströme. Der entschiedenste Gegner der Huttonschen Regentheorie scheint Wettstein[167]) zu sein. In der Abhandlung: „Die Beziehung der Elektricität zum Gewitter", berechnet er die latente Wärme und findet, dass diese einen Niederschlag verhindern muss.

Das Falsche seiner Schlussweise deckte bereits Hann[171]) auf und zeigte, dass wohl geringe Niederschläge entstehen mussten.

Ich möchte nun Wettsteins Rechnungsweise bei Mischung konform für die aufsteigenden Ströme durchführen: Bei 25° kann ein cbm gesättigte Luft 22,7 gr Wasserdampf enthalten. Wird nun die Luft beim Aufsteigen auf 21° abgekühlt, so hat sie nur noch höchstens 18,1 gr Wasserdampf. Es kommen somit 4,6 gr zur Ausscheidung. Um 4,6 gr Wasser von 21° in Dampf von 21° zu verwandeln, sind $4{,}6 \times 591{,}9$ Calorien nötig. Die bei der Condensation freiwerdende Wärme beträgt somit 2722,74 Calorien. Diese Wärme muss zur Temperaturerhöhung der Luft verwendet werden. Diese braucht $1930 \times 0{,}2375$ Wärmeeinheiten pro 1° Temperatursteigerung. Das sind 458,375 Calorien. Es stehen 2722,74 zur Verfügung, also erhöht sich die Lufttemperatur um $\frac{2722{,}74}{458{,}375} = 5.9°$ C., erreicht somit eine Temperatur von $21 + 5{,}9 = 26{,}9°$, d. h. sie kann also noch mehr Wasser aufnehmen, als sie ursprünglich hatte, und ist ein Niederschlag also nicht zustande gekommen!

Das Falsche hieran haben wir bereits eingangs dieses Teiles erwähnt, und man sieht, dass dadurch auch der aufsteigende Strom keinen Niederschlag hervorbringen könnte.

Wenden wir die gewonnenen Resultate auf die Cyklonen an, so wird zunächst bei sogenannten Ausläufern und zungenähnlichen Minimis ein weitaus grösserer Regen beobachtet, als bei den gewöhnlichen Cyklonen.[172]) Wir haben früher jene Gebilde scharf abgesondert und ihre Entstehung durch parallele Windströme nachgewiesen. Es erhellt nun ohne weiteres, dass an den beiden Enden der Furche, wo die getrennten Ströme sich wieder vereinen, eine sehr innige Mischung stattfinden muss. Es müssen sich also zwei entgegengesetzt liegende Regencentren bilden. Diese Erscheinung bespricht auch Sprung[173]) und finden sich die Beobachtungen in einer dort citierten Abhandlung von Loomis.

Weiters erklärt sich die Lage des Regencentrums bei den eigentlichen Cyklonen unserer Gegenden im SE Quadranten:[174])

Da bei uns, wie früher erwähnt, meist ein S und W Strom die Ursache der Wirbel ist, so findet die intensivste Mischung im SE Quadranten, überhaupt auf der Vorderseite der Cyklone statt. In gleich einfacher Weise erklären sich die Beobachtungen über die Erstreckung der Regenareen von Loomis:[175])

Richtung der Bahn N 40° E Grosse Achse der Regenarea N 53° E,

Richtung der Bahn S 116 E, Grosse Achse der Regenarea S 118 E.

Zeichnet man die Ströme, welche eine solche Sturmbahn erzeugen müssen, so findet man leicht, dass die Regenarea südlich davon liegt, wo eben die Ströme sich mischen.

Ebenso erklärt sich das Zunehmen des Regens gegen die Westseite bei einer westlichen Bahnrichtung,[176]) man darf nur z. B. S Wind als Hauptstrom, W Wind als Neben-

strom nehmen und in E, resp. SE Wind übergehen lassen, wodurch, wie wir noch später erläutern, eine westliche Bahn resultiert, und man sieht, wie sich die Regenarea von SE über E nach NW dreht. Man braucht dann nicht die gewiss gekünstelte Annahme, dass die Luft bei Cyklonen mit westlicher Bahnrichtung im W Quadranten schneller aufsteige, als im E Quadranten.[177])

In sehr befriedigender Weise dürfte sich auch die Thatsache erklären, dass im Centralgebiet der Cyklone der geringste Niederschlag statthat;[178]) denn hier ist verdünnte Luft, die in relativer Ruhe sich nicht mit anderer Luft mischen kann; lediglich die oben einfallende Cirrusluft giebt Anlass zur Wolkenbildung ohne bedeutende Niederschläge. Wäre aber ein aufsteigender Luftstrom allein Ursache der Cyklone, so müsste doch, da derselbe im Innern des Trichters aufsteigt, auch im Centrum die grösste Regenmenge fallen.

Ebenso dürfte unsere Theorie eine Lösung der Streitfrage über den Einfluss von Regenfall auf Cyklonenentstehung bringen.[179])

Es liegen ja so sehr viele Beobachtungen vor, dass nach einem sehr starken Regenfall eine Cyklone entstand. Professor Hann weist an verschiedenen Stellen nach, dass der Regen nicht die Ursache der Depression sein könne. Es gehen jedoch fast ausnahmslos eine Wolkendecke und Niederschläge der Entstehung der Cyklonen voraus.

Ich glaube nun, dass Cyklonenentstehung und Regenentstehung koordiniert seien, denn da, wenn Luftströme ineinander dringen, nicht sofort auch die Cyklone fertig ist, so wird sich dieses Inanderdringen zunächst durch vorausgehenden Niederschlag anzeigen, den die Mischung beider Ströme verursacht. Es stimmt damit auch die Beobachtung überein, dass häufig vor dem Entstehen eine Präexistenz von schwachen cyklonalen Winden beobachtet wird.[180])

Abgesehen davon giebt es starke Cyklone ohne Regenfall[181]) und ist es nicht recht einzusehen, warum da der aufsteigende Strom keine Kondensation zustande bringt, während es jedenfalls leicht möglich sein kann, dass die Temperaturverhältnisse, resp. Feuchtigkeitsverhältnisse der beiden die Cyklone verursachenden Ströme einen Niederschlag durch Mischung ungünstig sind.

Es weist nun Hann[179]) sogar nach, dass den Regenfällen Barometersteigungen folgen, statt Depressionen. Wenn also ein aufsteigender Luftstrom Ursache von Niederschlag und Cyklone sein soll, so ist obige Thatsache unerklärbar. Dagegen dürfte durch unsere Ansicht die Sache dahin gelöst sein, dass da, wo die Mischung der Ströme vor sich geht, zugleich Stauung entsteht[182]) und so eine Steigerung des Luftdruckes herbeigeführt wird.

Alles zusammengefasst ergiebt sich, dass die geringen Niederschläge im Centrum der Cyklone durch die Mischung der herabfallenden oberen Luftschichten mit der wärmeren verdünnten Luft im Innern des Trichters entstehen; sodann die sehr ergiebigen Niederschläge im vorderen Quadranten der Umgebung der Cyklone durch Mischung der zusammenstossenden Ströme sich erklären, während endlich die immer[183]) vorangehenden Cirrusbänke durch die Wellen entstehen, welche dadurch zum Vorschein kommen, dass, wie wir gelegentlich des Cl. Ley-Hildebrandssonschen Schemas bemerkten, die obere Luft nachsinkt, die dann wie v. Helmholtz[163]) nachweist, jene Cirrusbänke durch Mischung veranlassen, indem sie nach Art der Wasserwellen überstürzen.

15. Fortpflanzung der Cyklonen.

Es erübrigt noch eine kurze Ausführung der Fortpflanzung der Cyklonen wie sie auf Grund der Experimente und der weiteren Schlussfolgerungen sich ergeben dürfte.

Ich möchte hier bemerken, dass gerade die Fortpflanzungsrichtung den Anstoss zur vorliegenden Theorie ge-

geben hat, da ja davon die praktische Verwertbarkeit derselben zum grössten Teil abhängt.

Die Anhaltspunkte zur Vorausbestimmung der Bahn sind bis jetzt noch sehr geringe, besonders in theoretischer Beziehung, während die typischen Zugstrassen der Minima lediglich in statistischer Weise sehr sorgfältig von van Bebber und Köppen behandelt sind.

Die physikalische Theorie nimmt hier nun wieder den Wasserdampf, den Helfer in aller Not, wie ihn Hann einmal treffend bezeichnet, um die durchschnittliche Richtung W—E unserer Cyklonen zu erklären. Die Kondensation und damit der Auftrieb der Luft, soll an der Stelle am stärksten sein, wohin die Fortpflanzung geschieht. Dies vertritt besonders Mohn,[184]) Reye[185]) u. a. Wie soll aber diese aufsteigende Bewegung gerade in dem Teil der Cyklone am heftigsten sein, wo die dortige Wolkendecke eine Abkühlung verursacht? Auch dürfte es nicht genügen, denn die Cyklonen ziehen oft nicht rein östlich, sondern sogar westlich. Freilich ist da dann eine zweite Hypothese wieder da, dass die S Luft eben dann sich beim Einströmen um 180° drehe. Doch ist gegen diese allzu künstliche Erklärung bereits Sprung[186]) aufgetreten.

Ich möchte hier nur noch anfügen, warum dann vor jener bekannten Umbiegung der Cyklonenbahnen im Atlantischen Ocean, die Cyklonen nach W ziehen, obwohl hier ziemlich gesättigte S Luft im E Quadranten eindringt, und die Annahme einer Drehung um 180° bei der geringen Ablenkung in der niederen Breite doch schwer haltbar wäre?

Ebenso ist die sogenannte Polartendenz der Cyklonen und die Bahnrichtung derselben in der Bay von Bengalen ohne weitere Hypothesen schwer erklärlich; denn die Cyklonen müssten doch die Gebiete mit höherer Temperatur und Feuchtigkeit aufsuchen. Vergleicht man aber z. B. die Januarkarte des mittleren Dunstdruckes[187]) mit den Cyklonenbahnen, so suchen letztere gerade den geringeren

Dunstdruck auf, wenn sie von Amerika sich über den Ocean allmählich nach Schweden wenden.

Die Cyklonen müssten auf dem Meere schneller vorrücken, als auf dem Lande, zum wenigsten müsste ein bedeutender Umschwung stattfinden beim Übertritt vom Meer aufs Land. Die Untersuchung von Loomis[188]) und von v. Bebber[189]) ergeben jedoch, dass ein solcher Unterschied nicht besteht.

Ebenso ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Sommer geringer, als im Winter, was gegen die physikalische Annahme spricht.[190])

Die von Ferrel[191]) gebrauchte Erklärungsweise, dass der Unterschied der Fliehkraft an der Polar- und Äquatorialseite der Cyklone die Fortpflanzung derselben bedingt, dürfte nicht die Zugstrasse X_a und III_a nach der Bezeichnungsweise van Bebbers[192]) entsprechen, da diese nach SE gerichtet sind.

Gegen die Behauptung von Andries,[121]) sowie von Ferrel,[193]) Siemens[194]) u. a., dass die oberen Luftströme die Fortpflanzung verursachen, ist wieder einzuwenden, dass die Cyklonen sich meist nicht bis zu dieser Höhe erstrecken und sodann ist bekanntlich die Richtung der oberen Ströme viel konstanter und lassen sich deshalb kaum alle typischen Zugstrassen zur Deckung bringen, endlich aber müsste die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine bedeutend grössere sein, als sie wirklich ist. Die Details wurden bereits früher erwähnt. Auf Grund der eingangs beschriebenen Experimente, sowie durch Vergleichung von 5 Jahrgängen der Hoffmeyerschen synoptischen Wetterkarten habe ich folgendes empirische Resultat gefunden:

Die Fortpflanzung einer Cyklone geschieht in der Resultante der beiden Ströme, welche den Wirbel hervorriefen.

Dasselbe findet man induktiv auf folgende Weise:

Wir sahen früher, dass der Wirbel in fortwährender Neuentstehung ist, dass nicht die gleichen Luftteilchen im

Wirbel bleiben. Da nun ein Luftstrom nicht eine Linie ist, sondern von grosser Breite, so ist leicht einzusehen, dass immer neue Streifen der beiden Ströme zusammenkommen müssen. Zur besseren Übersicht diene die Figur 5 auf Tafel I. Die Buchstaben a. b. c. etc. bezeichnen den in parallele Streifen zerlegten Hauptstrom B, dieselben Buchstaben mit Index 1 bezeichnen eben solche Streifen des Nebenstromes D im Horizontalschnitt. Das Zusammenstossen beider Ströme ist ja kein plötzliches, sondern ein allmähliches, indem beide ihren Platz zu behaupten suchen.

Zunächst treffen die Streifen a und a^1 zusammen, es entsteht die Cyklone A. Da nun a^1 dem a den Weg abgeschnitten hat, so kann nunmehr b^1 mit b zusammenkommen, demgemäss jetzt der Wirbel bei A^1 zum Vorschein kommt u. s. w.

Nimmt man diese Streifen klein genug, so sieht man, wie der Wirbel dadurch, dass immer neue Stromteile zusammenstossen, erhalten wird und zugleich einen horizontalen Weg zurücklegt, der in der Resultante der beiden Ströme liegt. Bei einem Flusse kann man das sehr gut beobachten. Je stärker der Hauptstrom ist, desto mehr folgt der Wirbel seiner Richtung und der Nebenstrom kann auf die Bahnrichtung nur wenig Einfluss geltend machen. Die Geschwindigkeit, mit der der Wirbel fortschreitet, ist ebenfalls die Resultante aus jener der beiden Ströme, resp. ihrer verschiedenen Parallelstreifen.

Da nun ein Strom bei dieser Breite keineswegs in allen Teilen gleiche Geschwindigkeit hat, so wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ebenfalls wechseln während der ganzen Wegstrecke. Kommen keine neuen Teile der beiden Ströme zum Zusammenstoss, so ist die Ursache für die Wirbelentstehung aufgehoben; aber deswegen muss der Wirbel, der bereits entstanden ist, nicht sofort erlöschen, daran hindert ihn die lebendige Kraft, die ihm aus den Stromteilen, die zuletzt in Berührung kamen, mitgeteilt ist.

Es wird ihm sozusagen nur die Nahrung entzogen und die Folge muss sein, dass der Wirbel wohl noch eine Zeit lang hauptsächlich von dem jetzt nur mehr allein vorhandenen Hauptstrom fortgetragen wird, aber die Wirbelkraft erlischt allmählich, der Wirbel verflacht sich, bis er endlich zu bestehen aufhört.

Weiters ist aus dem Gesagten noch zu folgern, dass, solange beide Ströme unverändert fortdauern, auch immer in Intervallen Wirbel folgen müssen. Durch den erstentstandenen Wirbel A wird verhindert, dass a^1 und a sich sofort wieder treffen können. Ist aber der Wirbel mit seinem ganzen Windsystem weiter weggezogen, so kann a^1 und a wieder zusammenkommen, vorausgesetzt, dass die Ströme B und D noch in derselben Weise bestehen bleiben. Jede Cyklone, die neu entsteht, wird aber durch die in ihrer Nähe eintretenden Witterungserscheinungen dazu beitragen, dass die beiden Ströme ihre Richtung verändern, indem sie dem einen oder anderen zur unbestrittenen Herrschaft verhilft. Es kann also je nach Lage der allgemeinen und besonderen Witterungslage nur eine bestimmte begrenzte Anzahl von Wirbeln einander folgen, die gleiche Bahnen einschlagen.

Während der Wirbel fortschreitet, kann auch seine Gestalt wechseln, er kann zwischen parallele Strömungen kommen und es wird dann eine elliptische Cyklone aus ihm. Weiters ist es möglich, dass ein Wirbel, während er bloss mehr vom Hauptstrom allein fortgetragen wird, durch einen neuen in den Hauptstrom eindringenden Nebenstrom an Energie wieder gewinnt. Würde dieser Nebenstrom aber eine andere Drehungsrichtung hervorbringen, so erfolgt eine schnelle Auflösung des Wirbels, indem er sich gleichsam abwickelt.

Dies in kurzer Übersicht die induktiven Ableitungen, welche wir jetzt mit den Beobachtungen vergleichen wollen.

Köppen[195]) stellte den Satz auf: „Die Fortpflanzung der barometrischen Depression geschieht annäherungsweise in der nach ihrer Gesamtenergie innerhalb der Depression vorwiegenden Luftströmung."

Dieser Satz folgt unmittelbar aus unseren Ableitungen: Denn da die Resultante immer mit dem Hauptstrom den kleineren Winkel bilden muss, so ist die Folge, dass die Depression nur wenig vom Hauptstrom, d. h. der überwiegenden Windrichtung in der Umgebung der Cyklone, abweichen kann. In Sprungs Lehrbuch der Meteorologie bietet die auf Tafel VI enthaltene Karte vom 25. Oktober 1882 ein vortreffliches Beispiel hierfür.

Sodann stellte Cl. Ley[196]) den Satz auf, dass die Cyklonen die höhere Temperatur meist auf der rechten Seite ihrer Bahn haben und ins Gebiet niederer Temperatur eindringen. Aus Früherem wissen wir, dass die Luftströme von kalten Orten den wärmeren unten zuströmen, da nun sowohl der Haupt- als Nebenstrom untere Winde sind, und die Cyklonen immer zur Linken sozusagen der Konfliktstelle entstehen (was auch aus unserer Angabe über Zusammenhang von Maxima und Minima folgt), so liegt das Gebiet höherer Temperatur zur Rechten und die Depression bewegt sich demgemäss, wenn man die Resultante zieht, gegen das Gebiet niederer Temperatur zu.

Die Fortpflanzung geschieht ferner so, dass der höhere Druck zur rechten Seite liegt:[197]) Diese Thatsache folgt aus dem Zusammenhalte der Fortpflanzungsrichtung mit den früheren Ausführungen über örtliche Lage von Maxima und Minima.

Die Geschwindigkeit des Fortschreitens ist grösser in der kalten, als in der warmen Jahreszeit, der Unterschied beträgt ungefähr 15%. Die bezügliche Tabelle dieses Satzes stellte v. Bebber[189]) auf. Es folgt dies aus der Thatsache, dass die Winde infolge der Temperaturunterschiede im Winter eine grössere Stärke besitzen, als im Sommer, folglich wird auch die Resultante, die die Grösse für die

Fortpflanzungsgeschwindigkeit abgiebt, wachsen. Zugleich ist durch die grösseren Temperaturunterschiede im Winter die grössere Intensität der Ströme bedingt und somit nach Früherem auch eine grösserè Tiefe der Minima im Winter,[198]) wie überhaupt die Tiefe der Cyklonen mit Zunahme der Fortpflanzungsgeschwindigkeit wachsen muss,[199]) weil beide von der Intensität der bildenden Ströme abhängen. Ebenso geht aus der geringeren Geschwindigkeit resp. Stärke des Windes über dem Lande infolge der grösseren Reibung gegenüber dem Meere die Thatsache hervor, dass die Minima an Tiefe verlieren, wenn sie das Land betreten,[200]) während die physikalische Theorie das Gegenteil verlangt, da die Erwärmung eine grössere würde. Es mag noch kurz hingewiesen werden auf die Übereinstimmung zwischen der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wirbel und der mittleren Windgeschwindigkeit der bildenden Ströme, worunter natürlich nicht die zum Wirbel selbst gehörigen Winde zu verstehen sind.

Es würde zu weit führen, in diesem Rahmen genaue Resultate zu suchen, denn einerseits müsste man für ganz bestimmte Fälle die Windgeschwindigkeit oder Stärke der unteren Winde für weitere Strecken kennen und sodann auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der betreffenden, durch diese Winde entstandenen Cyklone.

Wir müssen uns deshalb wie früher bei den oberen Strömen auf Mittelwerte beschränken: Einer Tabelle von Köppen[201]) über die Winde in St. Petersburg 1872/73 kann man entnehmen, dass die Stärke 3 fast das Maximum (3,2) ist, für den Fall dass Petersburg im Gebiete einer Cyklone liegt.

Wir dürften also keinen grossen Fehler machen, wenn wir als mittleren Wert der Resultante — die ja nicht aus den zur eigentlichen Cyklone unmittelbar gehörigen Winden gewonnen wird, sondern aus den weiterhin verfolgbaren Luftströmen der Umgebung, von denen die Cyklone getragen werden kann — die Stärke 3 annehmen, was nach

Mohn[202]) einer ungefähren Geschwindigkeit von 8 m pro Sekunde entspricht. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Minima für Europa beträgt 7.4 m pro Sekunde.[203]) Diese Übereinstimmung der Mittelwerte ist jedenfalls viel besser, als die der oberen Ströme verglichen mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Minima.

Ein Specialfall der Fortpflanzung ist die bekannte Umbiegung der Cyklonenbahnen in den niederen Breiten des Atlantischen Oceans. Die bereits besprochene Theorie von Mohn über das Eindringen der warmen Luft im Ostquadranten kann hier nicht benützt werden. Es sind vor allem zwei Theorien von v. Lommel[204]) und Wittwer,[205]) welche, beide in den Hauptpunkten übereinstimmend, eine ungezwungene Erklärung geben. Da ich sie als bekannt voraussetze, möchte ich nur einige Modifikationen erwähnen, die eintreten, wenn man die Entstehung der Cyklonen nach unseren obigen Deduktionen annimmt.

Die an der Nordostküste Amerikas auftretenden Cyklonen werden durch den Nordostpassat als Hauptstrom und dem von der Küste kommenden Druckwind hervorgerufen und folgen somit der Resultante längs der Küste gegen die Insel Kuba.

Es wird also bis hierher im SE Quadranten eine Stauung, wie ja schon früher bewiesen, eintreten, und stimmt dies mit der Ansicht v. Lommels überein, nur dass ich über die Entstehung der Cyklone meinen früheren Ausführungen folgte. Der Wirbel kommt nun in das Gebiet der veränderlichen Winde und wird bei Florida von den aus Nordamerika kommenden W Winden aufgenommen, die ihn dann allmählich nach NW wenden.

Man sieht die Möglichkeit dieser Fortpflanzungsrichtung sehr gut aus der Isobaren- und Windkarte für Januar in Berghaus, Phys. Atlas, 3. Aufl., Nr. 33 (entworfen von Hann 1884). Vergleicht man jedoch dieselbe Karte Nr. 34 vom Juli, so findet man, dass jetzt die Umbiegung erst in höherer Breite erfolgen kann, da sich ja jetzt die Passat-

grenze nach Norden verschoben hat und dadurch auch die westlichen Winde. Die Juli-Windkarte zeigt die Bahn sehr schön, wie der Wirbel des einen Windsystems von einem anderen aufgenommen wird.

Diese Verschiebung der Umbiegung nach Norden im Sommer entspricht aber wieder den Beobachtungen, wie aus einer Abhanlung von Loomis[206]) hervorgeht. Weiters aber wird diese Erklärungsweise, dass die Cyklone von den vorherrschenden unteren Winden getragen wird, d. h. zunächst in der Richtung der Resultante zwischen dem Hauptstrom und dem einfallenden Nebenstrom zieht, dann meist von einem Strom allein weiter getragen wird, wobei sie sich allmählich erweitert und an Kraft verliert auch der Beobachtung gerecht, dass nicht alle Cyklonen umbiegen, was sie nach der Kondensationstheorie müssten, sondern gegen das Innere von Mittelamerika dringen, wie z. B. der Sturm vom 23. VI. 1834 oder vom 12. VIII. 1835.[207]) Im Anschluss an diese Beobachtung, dass die Bahnen der Cyklonen mit den mittleren Winden übereinstimmen, möchte ich darauf hinweisen, dass, soweit ich diese Beobachtungen gemacht habe, die sogenannten typischen Zugstrassen der Minima mit den in derselben Jahreszeit herrschenden mittleren Windrichtungen zusammenfallen, wobei natürlich bei uns in Europa zu beachten ist, ob eine Cyklone erst durch diese Winde hervorgerufen wurde, wo sie dann der Resultante folgt, oder ob sie von aussen kommend nur aufgenommen und fortgetragen wird, also bereits ihre Energie verloren hat, es sei denn, dass sie durch neu einfallende Ströme wieder an Tiefe gewinnt und sozusagen neu entsteht.

Damit möchten die wichtigsten Konsequenzen gezogen sein, die aus der Annahme entstehen, dass die Cyklonen durch verschieden gerichtete Strömungen der unteren Atmosphäre entstehen und sich weiterentwickeln; also einer rein mechanischen Wirkung der allgemeinen Luftcirkulation Ursprung und Fortdauer verdanken, wie dies Hann[57]) be-

reits vermutete. Es zeigt sich, dass, soviel in dieser gedrängten Übersicht verfolgt werden konnte, fast alle Phänomene sich ungezwungen erklären lassen, ohne dass weitere Hypothesen herangezogen werden müssten, und dass auch für die praktische Meteorologie Anhaltspunkte für die Entstehung und Fortpflanzung insbesondere der Cyklonen abgeleitet werden können, was der allgemeinen Gültigkeit einer Theorie nur zum Vorteile gereichen muss.

Die Vorherbestimmung des Entstehungsortes einer Cyklone und damit des Eintrittes stürmischen und schlechten Wetters wird nur davon abhängen, ob die von den verschiedenen meteorologischen Stationen gemeldeten Beobachtungen über Windrichtung und Windstärke sowie Barometerstand zahlreich genug sind, um aus ihnen die grossen Luftströmungen, welche zur gegebenen Zeit herrschen, erkennen zu lassen. Liegen rechtzeitig solche über möglichst grosse Gebiete ausgedehnte Beobachtungen vor, ähnlich wie dies bei unseren allerdings erst nachträglich fertiggestellten Wetterkarten im Anhang der Fall wäre, so ist es bei einiger Übung nicht schwer, die Ländergebiete zu finden, über welchen ein Konflikt der grossen verschiedenen Luftströmungen eintreten kann und somit eine Cyklone voraussichtlich zur Entstehung kommt.[208])

Zur Zeit sind allerdings die telegraphisch mitgeteilten Beobachtungen noch ziemlich spärlich, insbesondere haben wir keine rechtzeitigen Nachrichten über die Windverhältnisse auf dem für uns so wichtigen Atlantischen Ocean, und so wird sich die Vorhersage der Witterung in den westeuropäischen Ländern auf Grund vorliegender Theorie in vielen Fällen nur auf die Fortpflanzungsrichtung der vom Ocean her bereits auf dem Festland erschienenen Cyklonen beschränken müssen, indem uns nur die Luftströme des Festlandes rechtzeitig bekannt sind und wir wissen, dass die Cyklone immer in der Resultante jener Ströme fortzieht, welche zu ihrer Entstehung, beziehungs-

weise weiteren Erhaltung, durch neue Energiezufuhr beitragen können.

Jedenfalls aber bietet vorliegende Theorie auch beim Vorhandensein spärlicher Beobachtungsdaten dem praktischen Meteorologen immerhin Anhaltspunkte für das Entstehen und Weiterziehen der Cyklonen.

Literatur und Bemerkungen.

Es bedeutet: **Ö. Z.** = Meteorologische Zeitschrift, herausgegeben von der österreichischen Gesellschaft für Meteorologie und der deutschen meteorologischen Gesellschaft (Angabe in Jahrzahlen). **J. Sc. M. S.** Journal of Scottish Met. Soc. **A. J.** American. Journal of Science and Arts. **Ann. Hydr.** Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie. **v. Bebber, Hdb. II** v. Bebber, Handbuch der ausübenden Witterungskunde. 1886. II. Band. **Mohn, Grdz.** = Mohn, Grundzüge der Meteorologie. 1879. **Sprung, Lb.** = Sprung, Lehrbuch der Meteorologie. 1885. **v. Lommel, W. W.** = v. Lommel, Wind und Wetter. 1880.

[1]) Ö. Z. 1875 p. 81.
[2]) cf. Sprung, Lb., p. 234 u. a. a. O.
[3]) Annuaire pour l'an 1877 publié par le bureau des Longitudes. p. 483—602. „Sur les orages et sur la formation de la grêle: Vorletztes Kapitel: Vraies bases de la Meteorologie."
[4]) Ö. Z. 1882 p. 307 ff., p. 385 ff. u. 1883 p. 113 ff. u. p. 156 ff.
[5]) cf. Citat 57.
[6]) Ö. Z. 1882 p. 312.
[7]) cf. v. Bebber, Hdb. II., p. 201 ff.
[8]) Ö. Z. 1876 p. 278.
[9]) J. Sc. M. S. July 1872: „Results of an Inquiry into the mean Inclination of winds towards the lower Isobarics. cf. Ö. Z. 1874 p. 95.
[10]) v. Lommel, W. u. W. p. 129.
[11]) Ö. Z. 1872 p. 311.
[12]) Ö. Z. 1875 p. 133 u. 151 ff.
[13]) Wiedemann, Annalen der Physik, Bd. XVII. p. 128 ff.
[14]) Ö. Z. 1882 p. 312.
[15]) cf. Ö. Z. 1883 p. 107 u. 1888 p. 329.
[16]) Boltzmann, Vorlesungen, gehalten München Sommer-Sem. 1892.
[17]) Sprung, Lb., p. 132 ff.
[18]) Gehler, Physikalisches Handwörterbuch, Bd. X., Abt. 2, p. 1686 ff.
[19]) Ö. Z. 1882 p. 308 ff.

[20]) cf. v. Bebber, Hdb. II., p. 209.
[21]) Poggendorff, Annalen der Physik, Bd. CII., p. 246. Ö. Z. 1884 p. 227 u. 271.
[22]) Sprung, Lb., p. 243.
[23]) cf. Abbildung bei Sprung, Lb., p. 265.
[24]) Dove, Das Gesetz der Stürme in seiner Beziehung zu den allgemeinen Bewegungen der Atmosphäre. 1873.
[25]) v. Lommel, W. W., p. 191 ff. u. Ö. Z. 1874 p. 270.
[26]) v. Helmholtz, Math.-naturw. Mittlg. aus den Sitzgsber. d. Berliner Akad. 1889 p. 503.
[27]) cf. Wittwer, Klimatologie in Oberbayern in Bavaria. 1861.
[28]) Ö. Z. 1878 p. 345.
[29]) Ö Z. 1891 p. 243.
[30]) cf. Ö. Z. 1876 p. 157.
[31]) cf. v. Bebber, Hdb. II., p. 227 ff.
[32]) Ö. Z. 1885 p. 401 ff.
[33]) cf. Sprung, Lb., p. 210 f., wo die Anticyklonen als die passiven Phänomene gegenüber den Cyklonen hingestellt werden.
[34]) Ö Z. 1890 p. 328 u. 457 ff.
[35]) cf. Citat, 57, Referat im Ö. Z. 1891 Literaturber. p. 65 ff.
[36]) Ö. Z. 1890 p. 328 u. 1891 p. 183.
[37]) cf. Mohn, Grdz., p. 267, 261, 263 u. a. a. O.
[38]) Ö. Z. 1890 p. 328 u. 457.
[39]) Ö. Z. 1891 p. 244 ff. cf. Sitzungsber. der Berliner Akademie 1890 p. 1295—1317.
[40]) cf. sub 33, cf. auch Andries Ö. Z. 1883 p. 156, sowie die Theorie von Ferrel: A popular treatise on the winds. Neuyork 1889.
[41]) cf. Sprung, Lb., p. 240 ff. u. Möller Ö. Z. 1893 p. 293.
[42]) cf. Sprung, Lb., p. 215 i. f. Mohn, Grdz., p. 265.
[43]) Mohn, Grdz., p. 265.
[44]) Ö. Z. 1879 p. 38.
[45]) Ö. Z. 1891 p. 370. cf. v. Bebber, Hdb. II., p. 296.
[46]) Amer. Met. Journ. Vol. III. 1886 p. 117.
[47]) Sprung, Lb., p. 158.
[48]) Ebenda p. 212. v. Bebber, Hdb. II., p. 180.
[49]) cf. Ö. Z. 1892 p. 471 ff.
[50]) Mohn, Grdz., VI. Kapitel.
[51]) Ebenda p. 207 sub Ziffer 2.
[52]) Ö. Z. 1890 p. 226, 1888 p. 7 ff., 1891 p. 337, 1890 p. 328, 457.
[53]) cf. Loomis, Ö. Z. 1879 p. 226 u. v. Bebber, Hdb. II., p. 188.
[54]) Jahresbericht des Luftschiffahrtsvereins. München 1892.
[55]) Ö. Z. 1893 p. 269.
[56]) Ö. Z. 1891 p. 183 u. 1893 p. 315.

[57]) Sitzungsberichte der Akad. d. Wissensch. in Wien. Math.-Naturwissensch. Klasse Bd. C. Abt. II, a, April 1891.
[58]) cf. Ö. Z. 1891 p. 185.
[59]) cf. Sprung, Lb., p. 200.
[60]) cf. v. Bebber, Hdb. II., p. 176 u. Ö. Z. 1888 p. 9.
[61]) Erk, Jahresbericht des Luftschiffahrtsvereins. München 1891. Anlage 10 p. VI.
[62]) Ö. Z. 1892 p. 141 ff.
[63]) Ö. Z. 1893 p. 16.
[64]) cf. Ö. Z. 1890 p. 227.
[65]) Ö. Z. 1893 p. 170.
[66]) Ö. Z. 1891 p. 219.
[67]) Denkschrift d. Wiener Akademie, Bd. LVIII., 1891.
[68]) v. Lommel, W. W., p. 191 u. 198.
[69]) Ö. Z. 1875 p. 106.
[70]) Ermann in Berghaus physik. Atlas 1845 p. 60.
[71]) Hildebrandsson: Atlas des mouvements supèrieurs de l'atmosphère. 1887. cf. Sprung, Lb., p. 214.
[72]) Loomis, Contrib. to Met. Tourth and fifth Pap. A. J. Vol. XI. u. XII. cf. Ö. Z. 1876 p. 303.
[73]) v. Bebber, Hdb. II., p. 183.
[74]) Ebenda, p. 176. Hann, Ö. Z. 1876 p. 129 ff. Reye, Ö. Z. 1873 p. 180.
[75]) Hann, Ö. Z. 1893 p. 316. Mohn, Grdz., p. 207 u. 263. v. Bebber, Hdb. II., p. 180.
[76]) Ö. Z. 1888 p. 360.
[77]) Ciel et Terre IIeme année N. 21. 1882.
[78]) Ö. Z. 1882 p. 49.
[79]) Ö. Z. 1891 p. 184.
[80]) Ö. Z. 1898 p. 316.
[81]) cf. p. 29, jedoch auch p. 34 dieser Abhandlung.
[82]) Beobachtungen am Ben Nevis. Ö. Z. 1893 p. 102 u. 103.
[83]) Ö. Z. 1893 p. 304 f.
[84]) cf. Ö. Z. 1892 p. 468 mit ebenda 1889 p. 27.
[85]) Ö. Z. 1891 p. 219.
[86]) Hann, Ö. Z. 1893 p. 315, Anm. 1 u. Ö. Z. 1893 p. 58. R. J. Süring, Inauguraldissertation, Berlin 1890,
[87]) Poggendorff, Annalen d. Physik. Bd. CXVI. p. 311 ff.
[88]) Ö. Z. 1891 p. 183 u. a. a. O.
[89]) Jahresbericht d. Münchener Luftschiffahrtvereins 1891, Anlage 10, p. V.
[90]) cf. Mohn, Grdz., p. 264, Zeile 8 v. unten.
[91]) Ö. Z. 1891 p. 242 u. 337.

92) A. J. Bd. XV. 1878 Januar. Contrib. of Met. Eight Pap. Ö. Z. 1878 p. 312 ff.
93) Ö. Z. 1876 p. 103.
94) Lasne: Annuaire de la Societé Met. de France. 1886 p. 229 ff.
95) Berghaus, phys. Atlas, 1845, I. Abt. Karte 8 u. II. Abt. Karte 3. Hann, allg. Erdkunde, 3. Aufl., p. 161.
96) Science Vol. XXI, p. 346.
97) Mohn, Grdz., p. 252.
98) Hann, Ö. Z. 1873 p. 103 u. 1874 p. 290.
99) v. Lommel, W. W., p. 168 ff.
100) v. Bebber, Hdb. II., p. 214 f.
101) Ö. Z. 1888 p. 39 u. Ö. Z. 1888 p. 397.
102 Loomis, A. J., Contr. of Met. XI. Pap. 1879. Ö. Z. 1880 p. 239.
103) Redfield: On the Gales and Hurricanes of the Western Atlantic. Sill. Journ. 31. Okt. 1836, p. 115 ff. Piddington: The Sailors Storm Book for the Law of Storms. II. Ed. 1851. Reye: Wirbelstürme 1872, p. 83, wo Wirbelstürme des Westatlantischen Oceans nur einen Durchmesser von 100 bis 500 Kilometer besitzen.
104) Stürme in der Breite von 6^0—10^0 n. Br. Ö. Z. 1885 p. 528.
105) Berghaus, phys. Atlas, 1845, p. 77.
106) v. Bebber, Hdb. II., p. 208 u. 223.
107) cf. sub 57, u. Ö. Z. 1890 p. 459. Ö. Z. 1891, Litterat. Ber. p. 65.
108) cf. z. B. Sprung, Lb., p. 226.
109) Ebenda, p. 209 Anm. u. pag. 211, wo die Cyklonen mit kaltem Centrum als hypothetisch angesehen werden.
110) Ebenda p. 226 u. Möller, Ö. Z. 1893 p. 172.
111) Möller, Ö. Z. 1893 p. 290 ff.
112) Ö. Z. 1893 p. 303. v. Bezold, Ö. Z. 1891 p. 241.
113) Hann, Ö. Z. 1879 p. 33 ff. u. 349 ff.
114) Ö. Z. 1893 p. 173, Anm.
115) Möller, Ö. Z. 1893 p. 291 ff.
116) Poggendorffs Annalen der Physik. Bd. XCII. p. 179 ff.
117) Sitzgsber. d. K. bayer. Akad. d. Wissensch. 1862, p. 97, 99, 103.
118) Ebenda, p. 104 Anm.
119) cf. pag. 30 bis 32 dieser Abhandlung.
120) Faye: Sur les orages et la formation de la grêle. Annuaire pour 1877 publié par le bureau des longitudes. p. 483 ff.
121) Andries, Die Entstehung der Cyklonen. Ö. Z. 1882 p. 307 ff. u. 385 ff., 1883 p. 113 ff. u. 156 ff. cf. Annalen der Hydrogr. 1884 p. 1 ff., p. 65 ff., 1885 p. 125 ff.
122) Hirn, „Etude sur une classe particulière de tourbillons etc." Bulletin de la société d'histoire nat. de Colmar 1878.

123) Andries, Ö. Z. 1882 p. 312.
124) Ö. Z. 1883 p. 158.
125) Sprung, Lb., p. 234. v. Bebber, Hdb. II., p. 220, Zeile 14 v. oben.
126) Ö. Z. 1880 p. 305, 1883 p. 157.
127) Vettin, Ö. Z. 1882 p. 271.
128) Einl. zur monatl. Witterungsübersicht der deutschen Seewarte 1881. Köppen, Annalen der Hydrogr., 1882 p. 661.
129) Hann, Ö. Z. 1879 p. 35. Loomis: Contr. of the Met. A. J. Bd. XV, Jan. 1878, ebenda Bd. XVIII., July 79. Elliot, Ö. Z. 1877 p. 276.
130) Cl. Ley, Ö. Z. 1874 p. 15, 1878 p. 281, 1877 p. 365.
131) Ö. Z. 1883 p. 156, 1888 p. 305, v. Lommel, W. W., p. 127, Mohn, Grdz., p. 289, v. Bebber, Hd. II., p. 462. cf. Ö. Z. 1886, p. 553.
132) cf. Ö. Z. 1882 p. 311, wo eine tanzende Bewegung der Trichterspitze beschrieben wird.
133) cf. sub 130 u. v. Bebber, Hdb. II., p. 225 ff., 236 f. Sprung, Lb., p. 250. Loomis, A. J., Bd XVIII., Jan. 1879.
134) cf. p. 20 bis 24 dieser Abhandlung.
135) v. Bebber, Hdb. II., p. 239. Sprung, Lb., p. 149.
136) Cl. Ley, J. Sc. M. S. 1872 July. „Results of an Inquiry into the mean Inclination of winds towards the lower Isobarics. v. Bebber, Hdb. II., p. 225 f. Ö. Z. 1876 p. 263.
137) Ähnliche Beobachtungen über die verschiedene Intensität und Inklination der Winde in den verschiedenen Quadranten der Cyklone teilt Willson mit: Ö. Z. 1876 p. 101. cf. die Experimente im allgem. Teil.
138) cf. den allgemeinen Teil der Abhandlung.
139) v. Bebber, Hdb. d. Met. II., p. 233. Sprung, Lb., p. 265.
140) Mohn, Grdz., p. 250 f.
141) p. 51 dieser Abhandlung.
142) Hann, Ö. Z. 1875 p. 82.
143) Dies nimmt Andries, Ö. Z. 1882 p. 313 an.
144) v. Bebber, Hdb. II., p. 223 f. Sprung, Lb., p. 252.
145) v. Bebber, Hdb. II., p. 258 ff. Mohn, Grdz., p. 260.
146) v. Bebber, Hdb. II., p. 220 i. f.
147) Ebenda p. 223 ff. u. das dort Citierte.
148) Cl. Ley, The Laws of the Winds prevailing in Western-Europe, Part. I., 1872.
149) Nach Vorlesungen d. Hrn. Professors Boltzmann über Hydrodynamik, gehalten in München 1882 Sommer-Sem.
150) cf. p. 10 dieser Abhandlung.
151) Ö. Z 1876 p. 109.
152) Ö. Z. 1877 p. 276.

153) Mohn, Grdz., p. 299. v. Bebber, Hdb. II., p. 208. Reye, Wirbelstürme etc. p. 83.
154) v. Lommel, W. W., p. 135.
155) Ebenda, p. 133, 134.
156) cf. p. 63 dieser Abhandlung.
157) Ö. Z. 1874 p. 95.
158) v. Lommel, W. W., p. 130 ff.
159) Sprung, Lb., p. 247 ff. v. Bebber, Hdb. II., p. 225 ff.
160) Hann, die Erde als Weltkörper, p. 92.
161) Sprung, Lb., p. 252.
162) Moderne Meteorologie, sechs Vorlesungen. 1882. p. 135. Cl. Ley, Ö. Z. 1874 p. 15. Sprung, Lb., p. 275. Richter, Ö. Z. 1881 p. 379 teilt mit, dass die Cirrusbänke die Richtung S 84 W haben.
163) v. Helmholtz, Sitzungsber. der Berliner Akademie d. Wissensch. 1889, p. 761—780 u. 1888 Nr. 26. cf. Jahresbericht des Luftschiffahrtsvereins München 1893 p. 47.
164) Ö. Z. 1877 p. 308.
165) v. Bebber, Hdb. II., p. 296.
166) Billwiller, Ö. Z. 1878 p. 253. v. Friesenhof, Ö. Z. 1876 p. 108 f. Cl. Ley: Annalen d. Hydrogr. 1882 p. 657.
167) Wettstein: Die Beziehungen der Elektricität zum Gewitter. Zeitschrift der Naturforscher-Gesellschaft, Zürich 1869.
168) Pernter: „Berechnung der Niederschlagsmengen bei Mischung feuchter Luftmassen von verschiedener Temperatur. Ö. Z. 1882 p. 421 ff. Ähnlich v. Bezold: Sitzungsber. d. Berliner Akademie. 1890 p. 365—390.
169) Moderne Meteorologie, 6. Vorlesung. 1882. 5. Vorlesung. cf. Andries, Ö. Z. 1883 p. 119.
170) v. Lommel, W. W., p. 135.
171) Hann, Über den Einfluss des Regens auf den Barometerstand und über die Entstehung der Niederschläge im allgemeinen. Ö. Z. 1874 p. 289 ff.
172) Hoffmeyer, Ö. Z. 1875 p. 6.
173) Sprung, Lb., p. 259. Ö. Z. 1884 p. 250 u. 252.
174) v. Bebber, Hdb. II., p. 250. Sprung, Lb., p. 258 u. dort citierte 17. Abh. v. Loomis. Auch die Bewölkung ist auf der Vorderseite der Cyklone am stärksten: Kassner, Inauguraldiss. Berlin 1893.
175) Sill. Amer. Journ. Vol. VIII. July 1874.
176) Sprung, Lb., p. 259.
177) Mohn, Grdz., p. 266, 252 ff. Sprung, Lb., p. 255.
178) v. Bebber, Hdb. II., p. 214. Loomis, Ö. Z. 1878 p. 315. Blanford, Ö. Z. 1873 p. 377.

[179]) Cl. Ley: The Laws of the Winds prevailing etc. Part. I. London. Ö. Z. 1874 p. 15. Hoffmeyer, Ö. Z. 1875 p. 8 ff. Elliot: Condensations Theorie of the Generation of Cyclones. Quaterly Journ. of the Royal Met. Soc. Jan. 1885. Ö. Z. 1877 p. 276 ff. Dagegen Hann ebenda p. 308 ff. Elliot, Ö. Z. 1880 p. 311. Hann ebenda p. 313. Reye, Ö. Z. 1873 p. 110 ff. cf. Übersicht bei Sprung, Lb., p. 230 ff. cf. noch Reye, Ö. Z. 1875 p. 65.

[180]) Ö. Z. 1877 p. 277.

[181]) Hann, Ö. Z. 1873 p. 103.

[182]) cf. Tafel I. Fig. 3.

[183]) Ö. Z. 1874 p. 15 ff. Moderne Meteorologie 6. Vorlesg. p. 135. v. Bebber, Hdb. II., p. 296.

[184]) Mohn, Det Norske Met. Instit. Storm Atlas etc. Christiania 1870. Derselbe, Grdz., p. 252 ff. Ö. Z. 1876 p. 17 ff.

[185]) Reye, Buch der Stürme etc. Ö. Z. 1873 p. 111.

[186]) Sprung, Lb., p. 255.

[187]) Berghaus, phys. Atlas.

[188]) Loomis, Contrib. tho. Meteor. X. pap. cf. Ö. Z. 1876 p. 287.

[189]) Monatl. Witterungsübersicht der deutschen Seewarte 1881. Einleitung.

[190]) v. Bebber, Hdb. II., p. 266 ff.

[191]) Ferrel cf. Ö. Z. 1875 p. 105.

[192]) v. Bebber, Hdb. II., p. 278.

[193]) Ö. Z. 1882 p. 276.

[194]) Ö. Z. 1887 p. 425.

[195]) Köppen, Annal. d. Hydrogr. 1882, p. 661 ff. u. a. a. O.

[196]) Cl. Ley: The Laws of the Winds etc. I., p. 15.

[197]) Brounow: Gaea, Bd. IXX., p. 137. Satz 8. Referat von Berg.

[198]) v. Bebber, Hdb. II., p. 258 ff.

[199]) Ebenda p. 272.

[200]) Monatl. Witterungsübersicht der deutschen Seewarte 1881 p. 25 ff.

[201]) Köppen, Über die Abhängigkeit des klimatischen Charakters der Winde von ihrem Ursprung. Repertorium für Meteorologie IV., Nro. 4.. 1874.

[202]) Mohn, Grdz., p. 138.

[203]) v. Bebber, Hdb. II., p. 266.

[204]) v. Lommel, Ö. Z. 1874 p. 270.

[205]) Wittwer, Ö. Z. 1875 p. 4.

[206]) Ö. Z. 1876 p. 304.

[207]) cf. Berghaus, phys. Atlas 1845, Karte Nr. 8.

[208]) cf. insbesondere p. 73 i. f. u. p. 74 dieser Abhandlung.

Anhang.

Hilfstafel und Wetterkarten.

Tafel I.

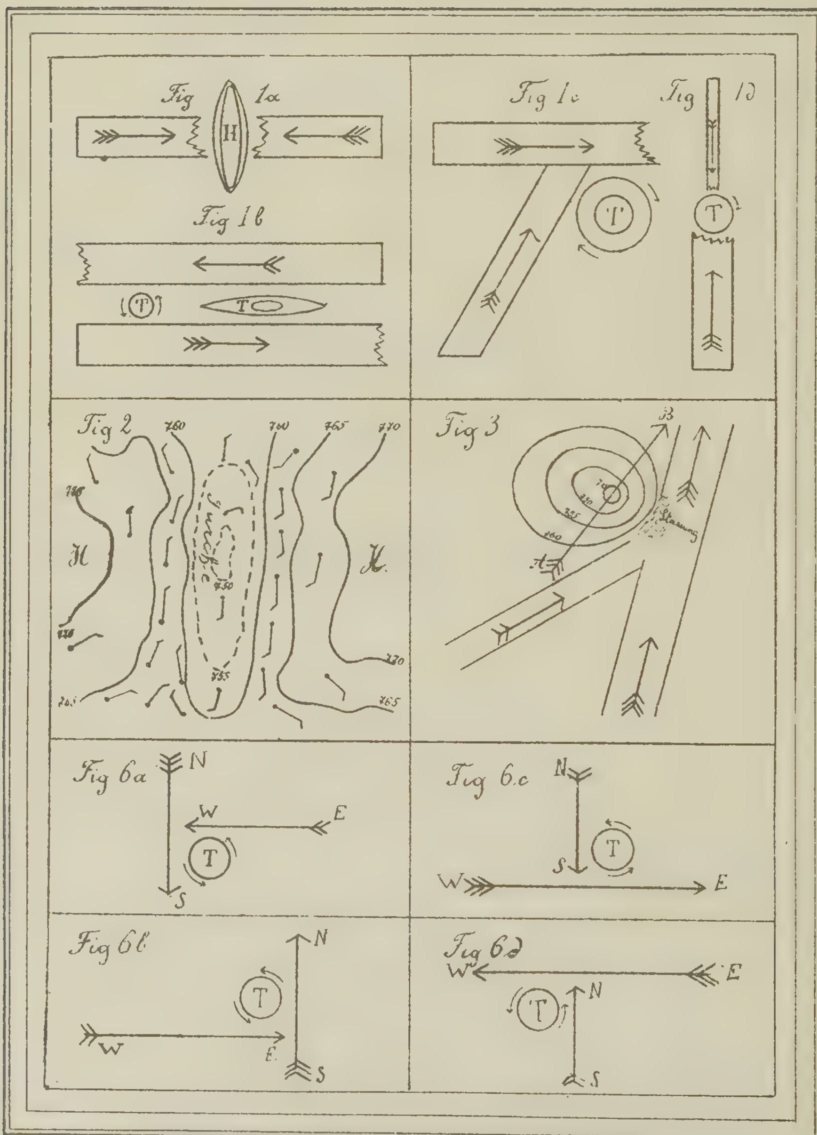


Fig 1a
H
Fig 1b
T
Fig 1c
T
Fig 1d
T
Fig 2
760
760
765
770
H
K
750
755
765
770
Fig 3
B
A
Stauung
Fig 6a
N
W
E
T
S
Fig 6c
N
T
S
W
E
Fig 6b
N
T
W
E
S
Fig 6d
W
E
N
T
S

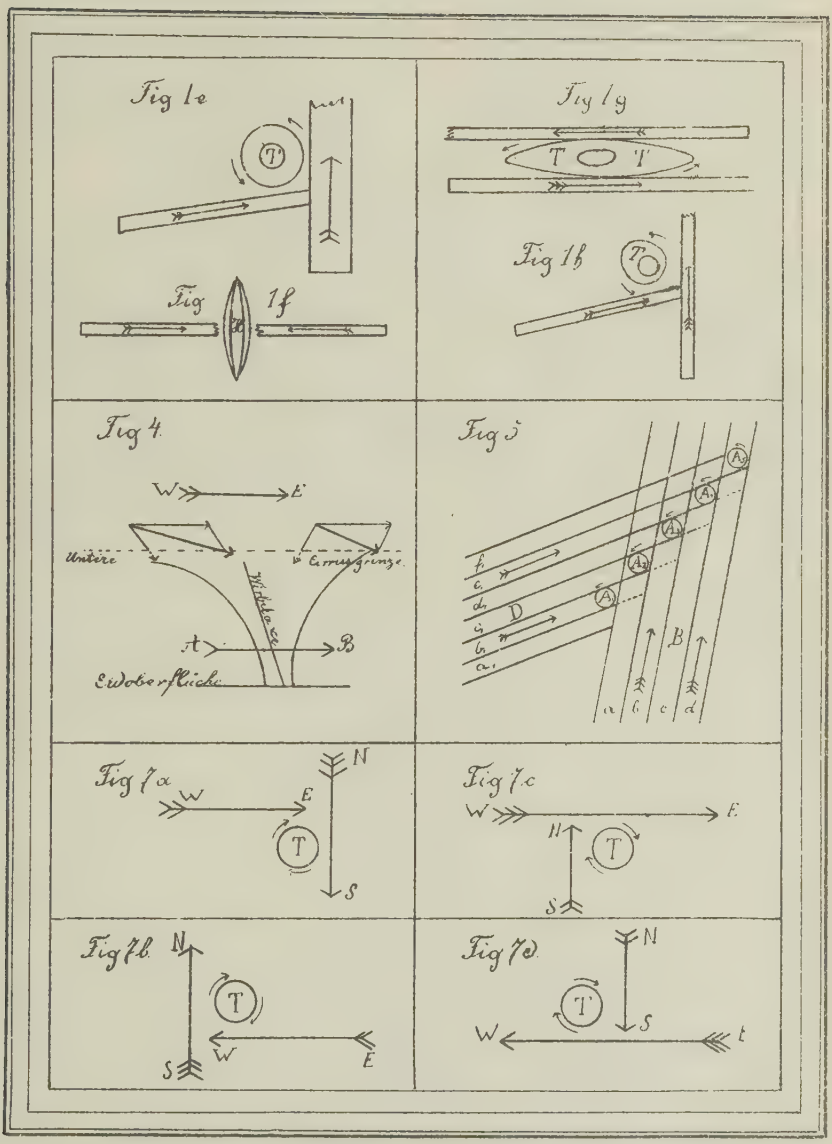
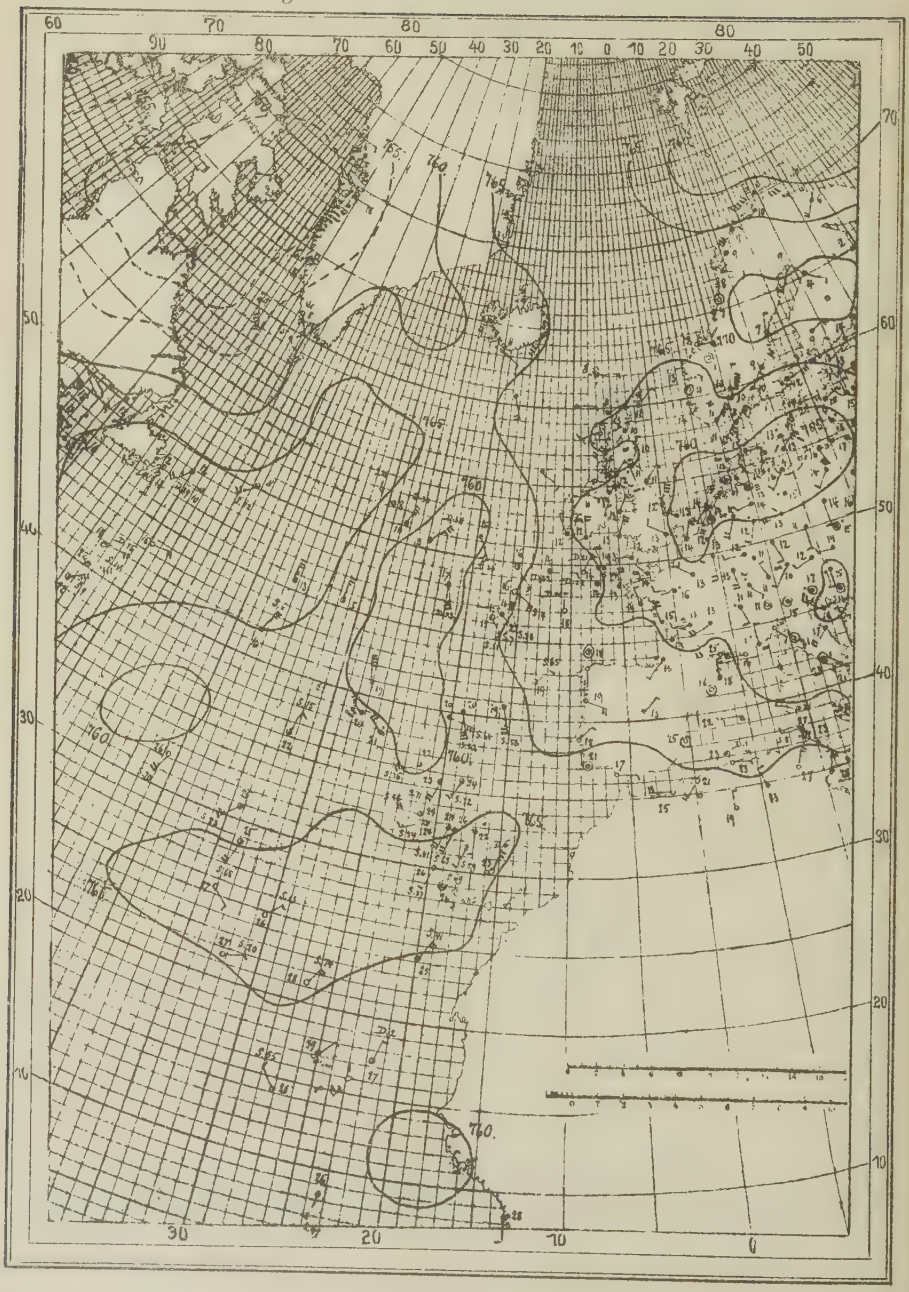


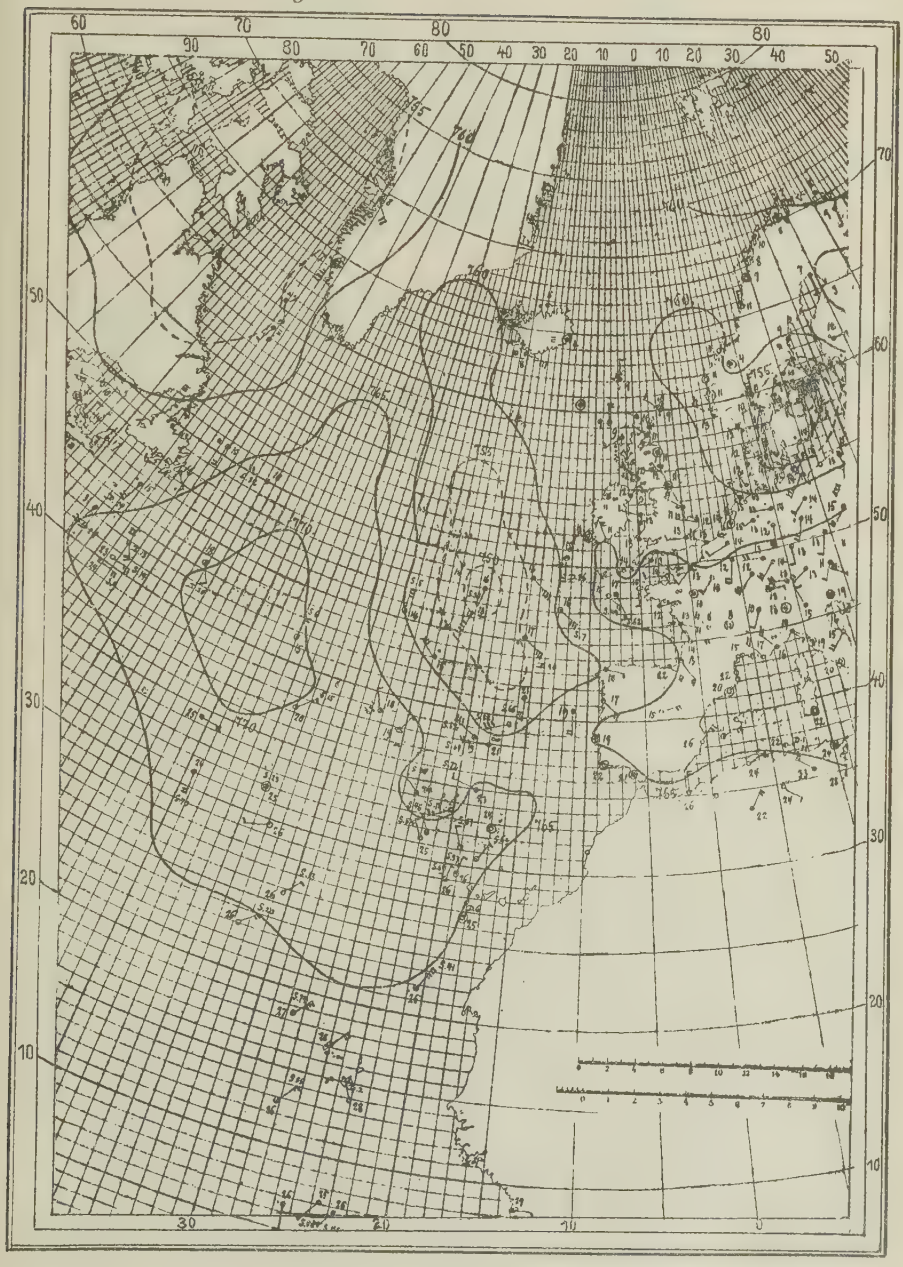
Fig 1e
T
Fig 1f
Fig 1g
T
T
Fig 1h
T
Fig 4.
W
E
Untere
Eisrussgrenze
Wirbelzone
A
B
Erdoberfläche
Fig 5
A
A
A
A
A
f
e
d
c
b
a
D
B
a
b
c
d
Fig 7a
W
E
N
T
S
Fig 7c
W
E
N
T
S
Fig 7b.
N
T
S
W
E
Fig 7d.
N
T
S
W
E

Tafel II.

12. September 1881. Morgens.

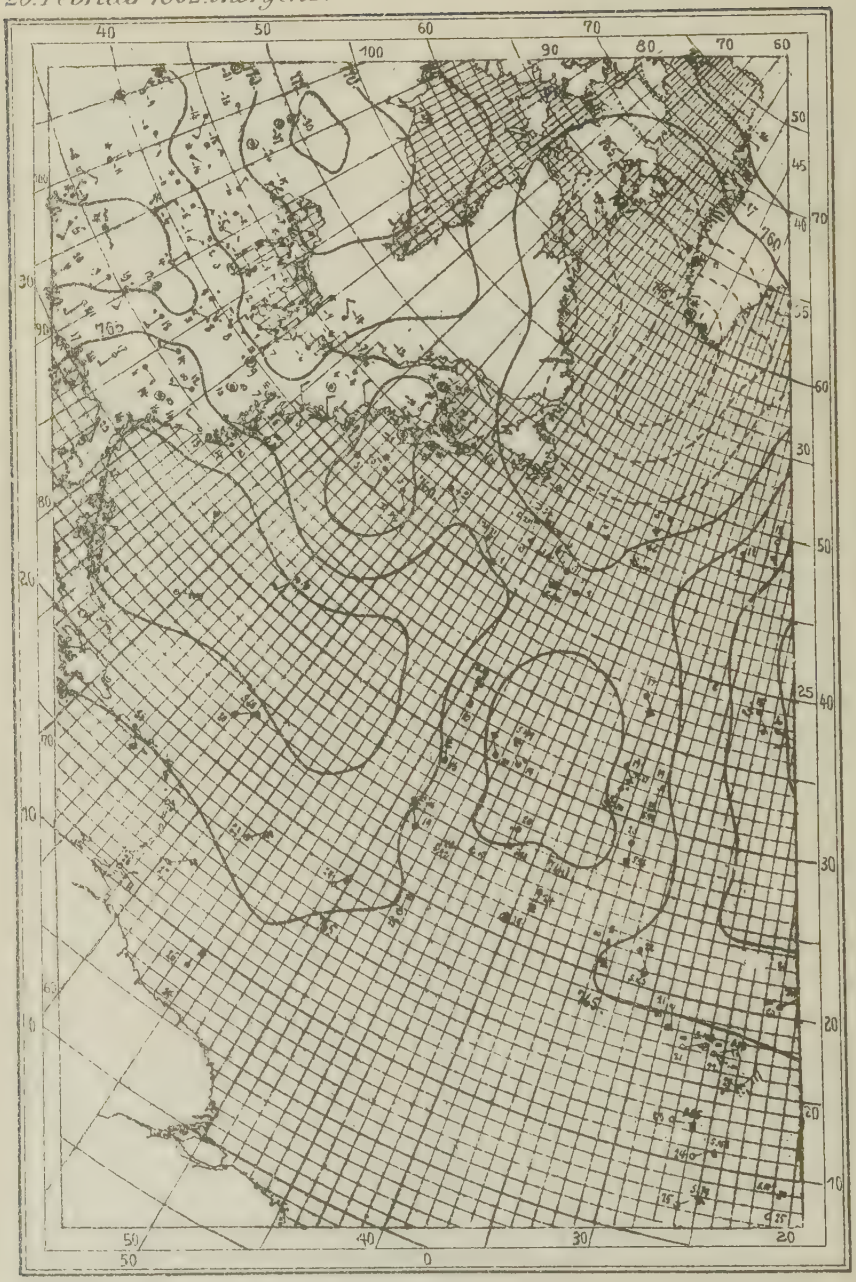


13. September 1881. Morgens

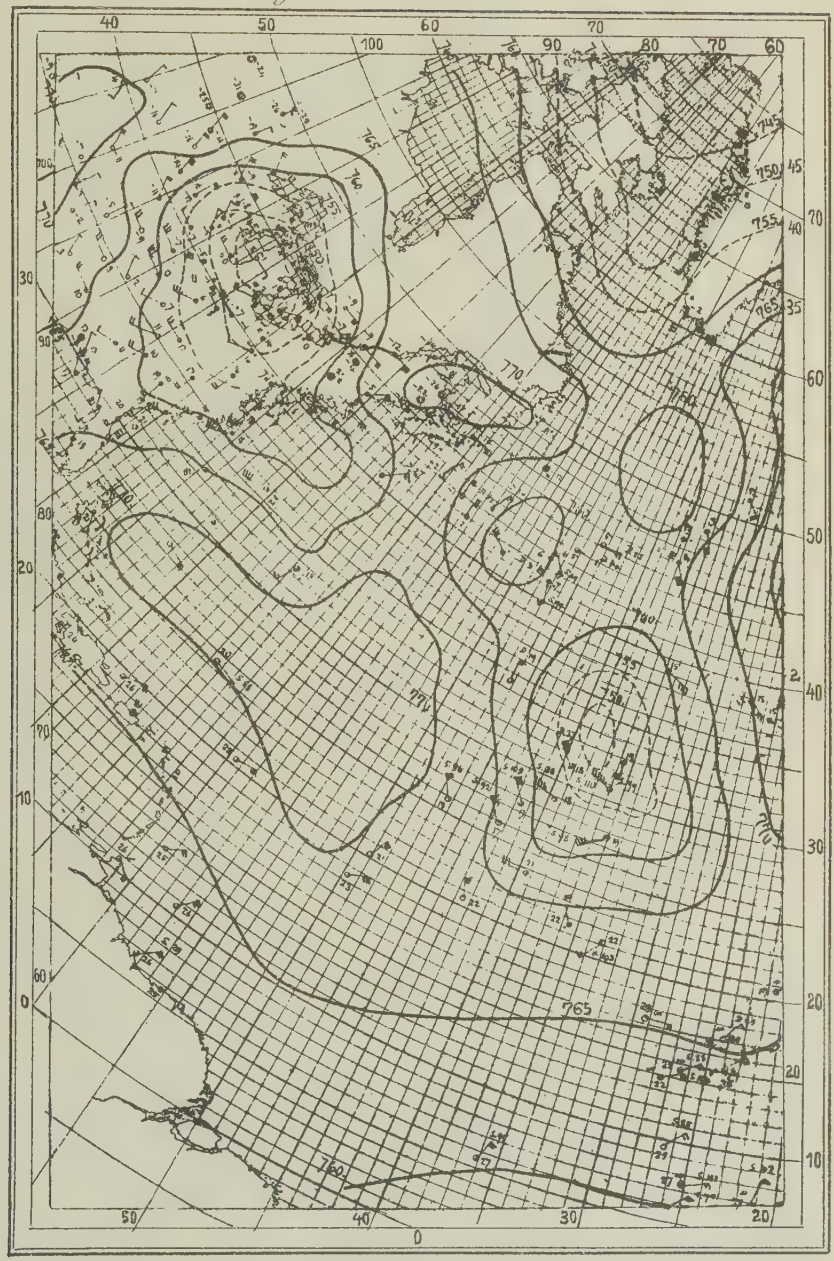


Tafel III.

20. Februar 1882. Morgens.

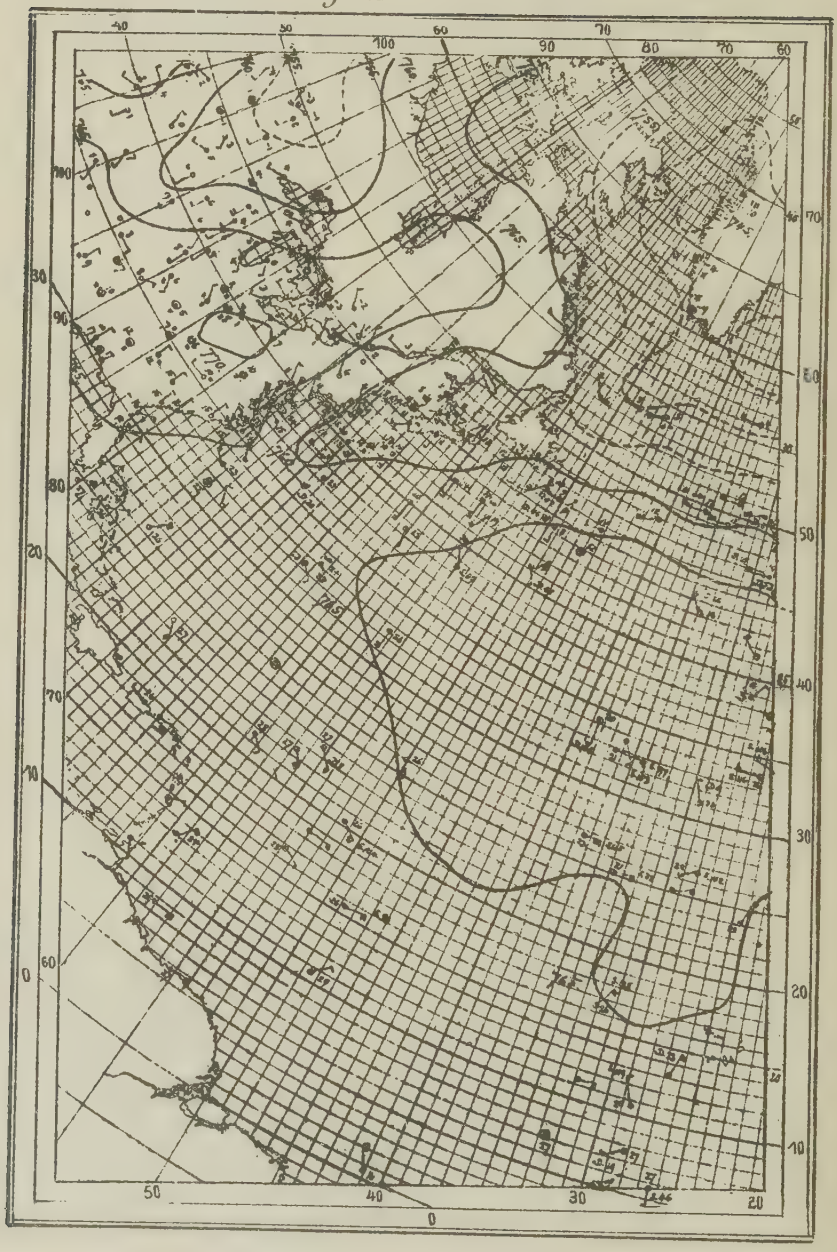


21. Februar 1882. Morgens.

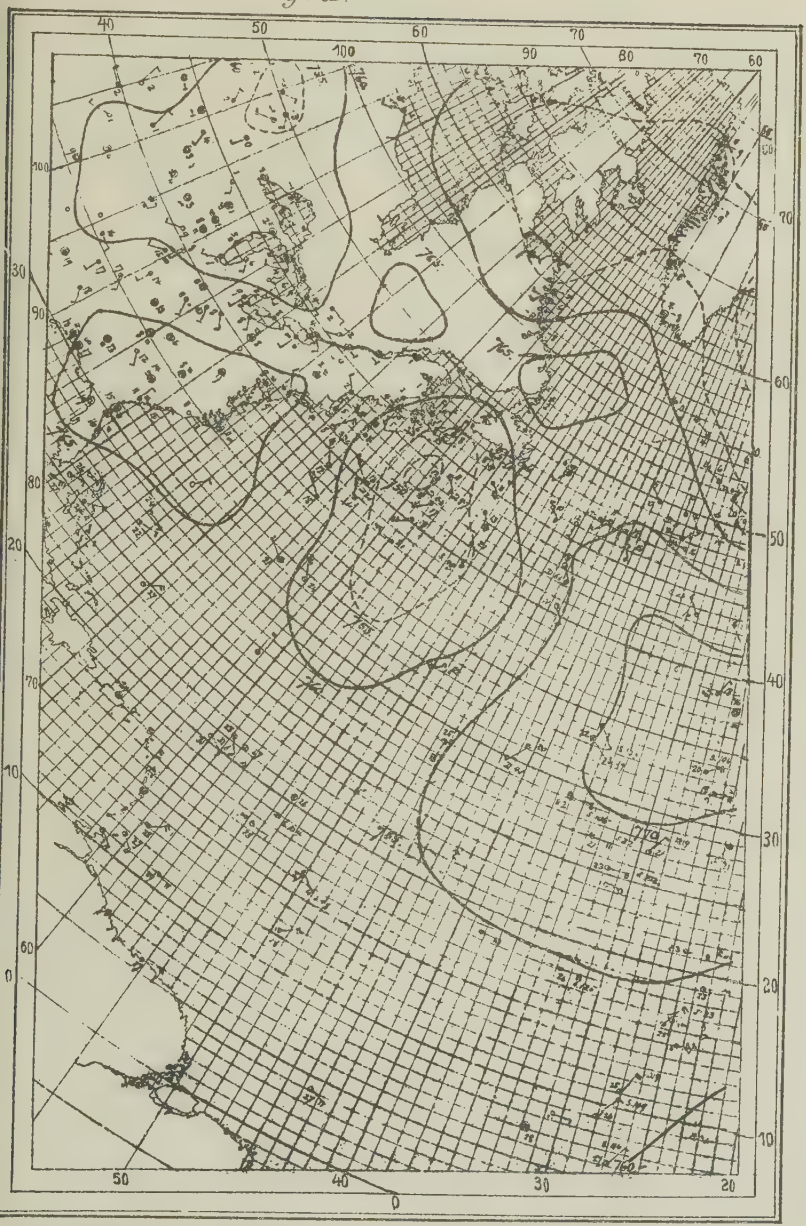


Tafel IV.

7. November 1883. Morgens.

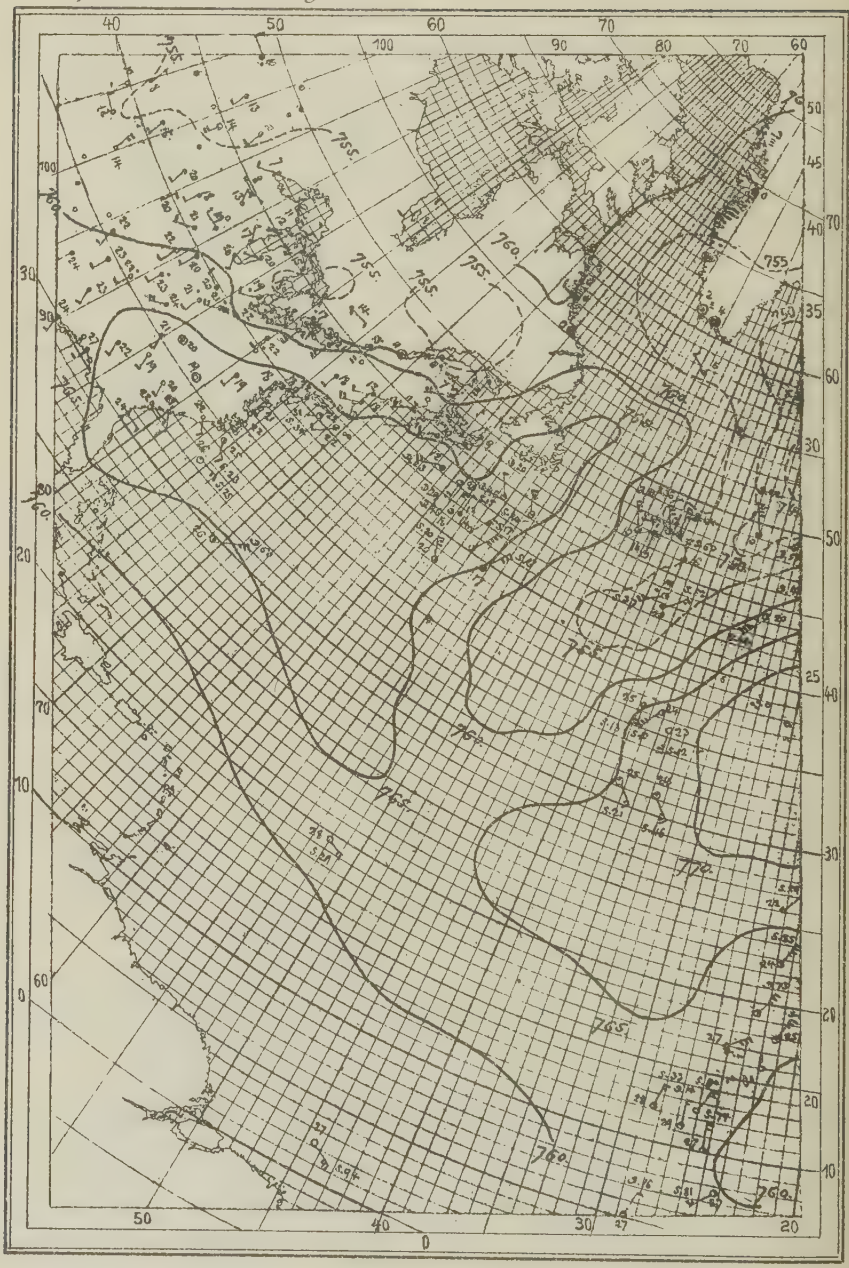


8. November 1883. Morgens.

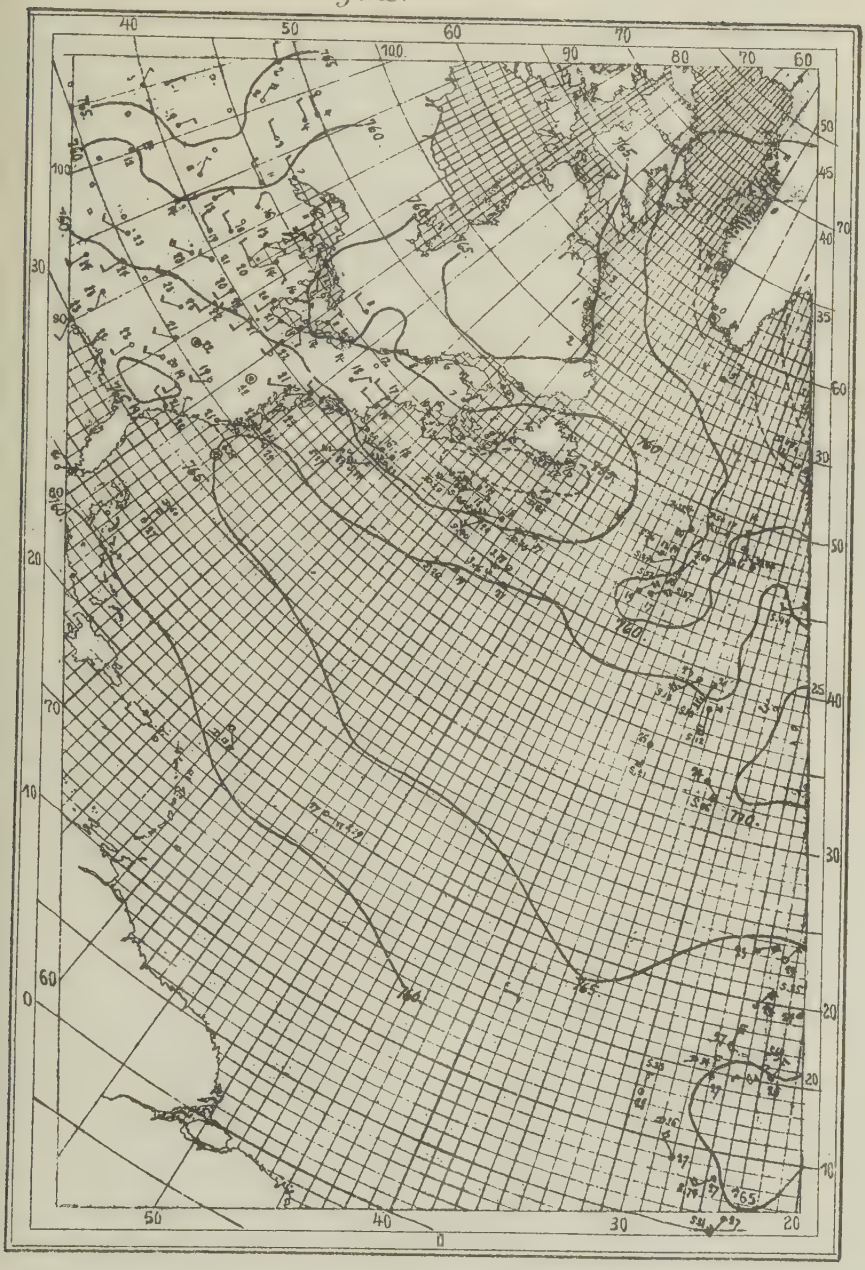


Tafel V.

26. September 1886. Morgens.

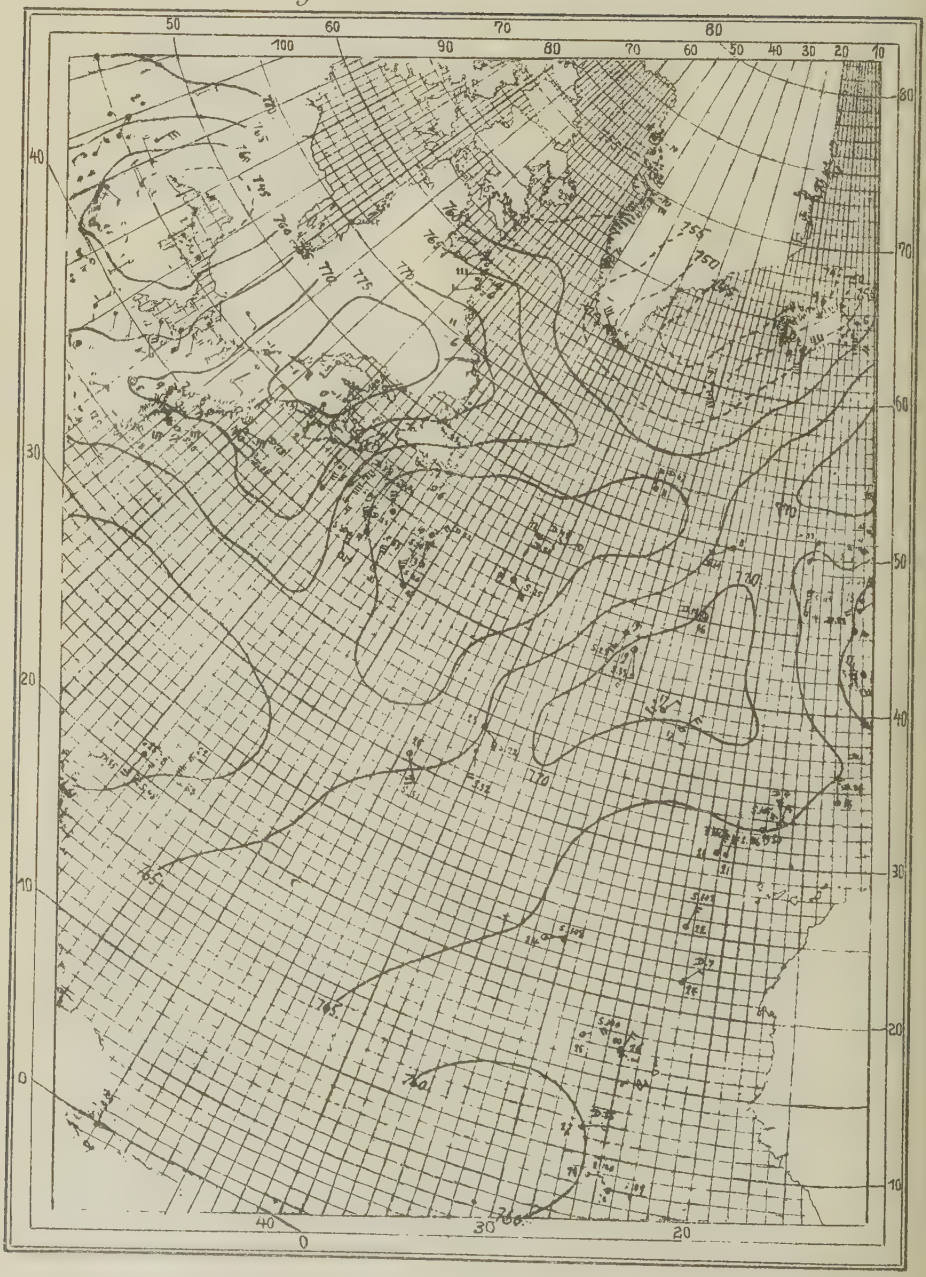


27. September 1886. Morgens.

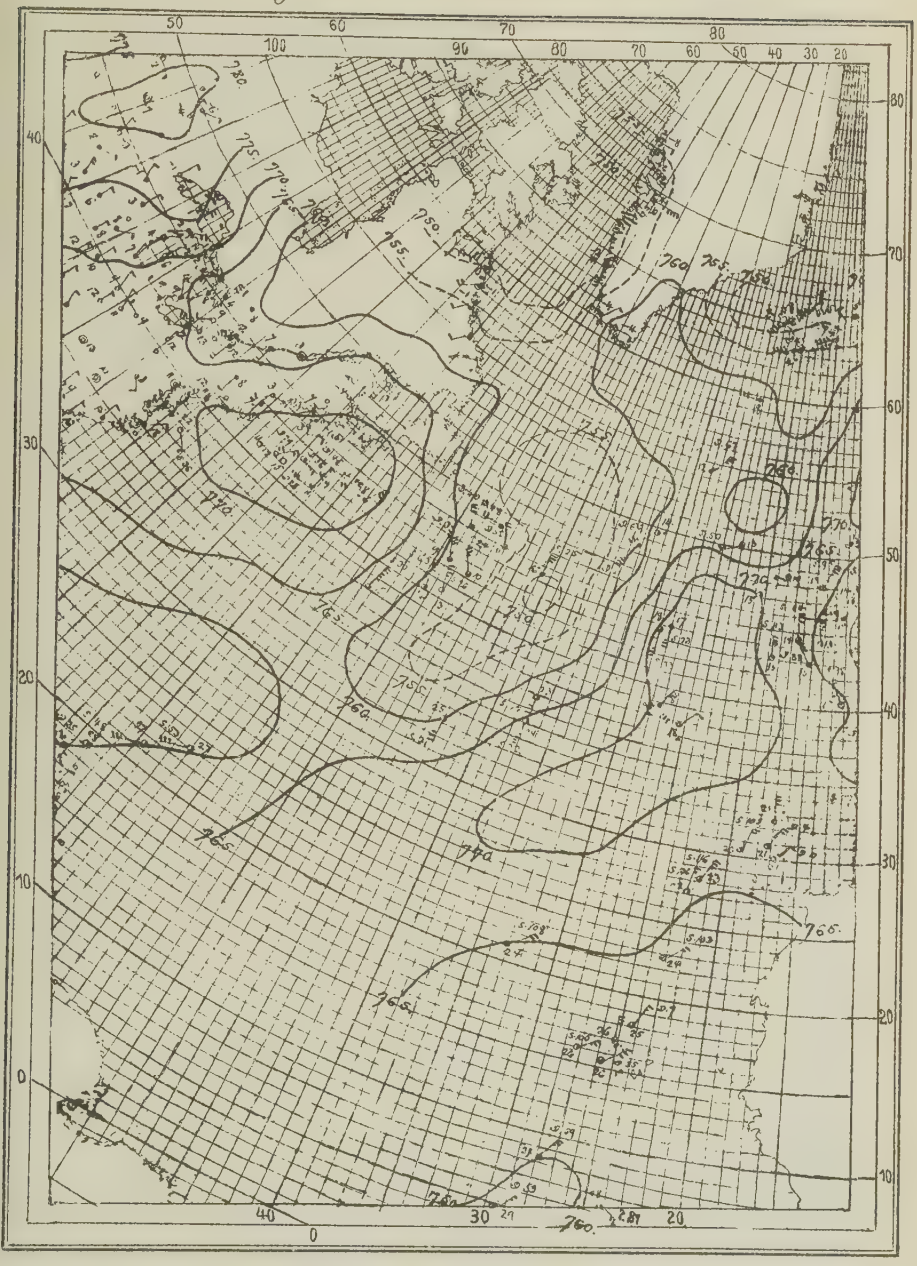


Tafel VI.

24. Oktober 1886. Morgens.

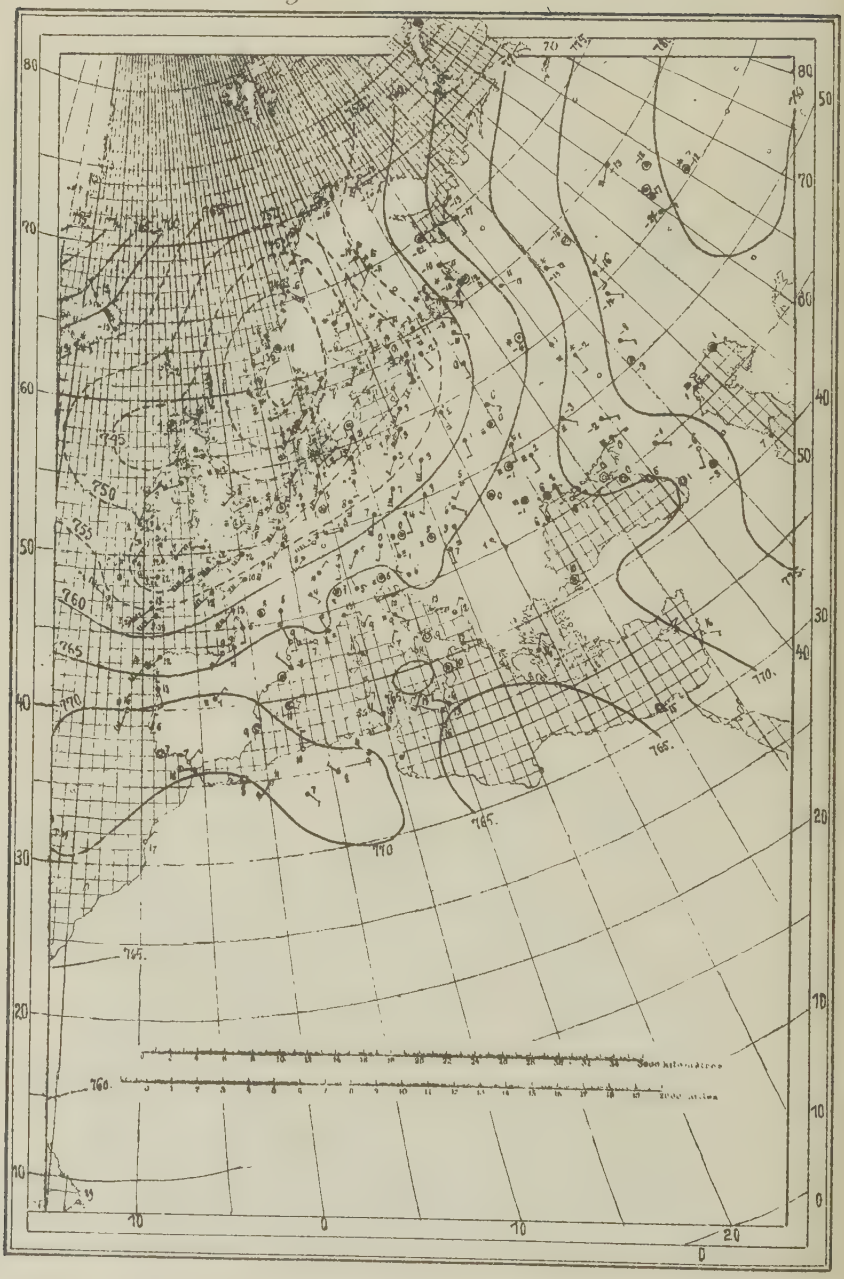


25. Oktober 1886. Morgens.

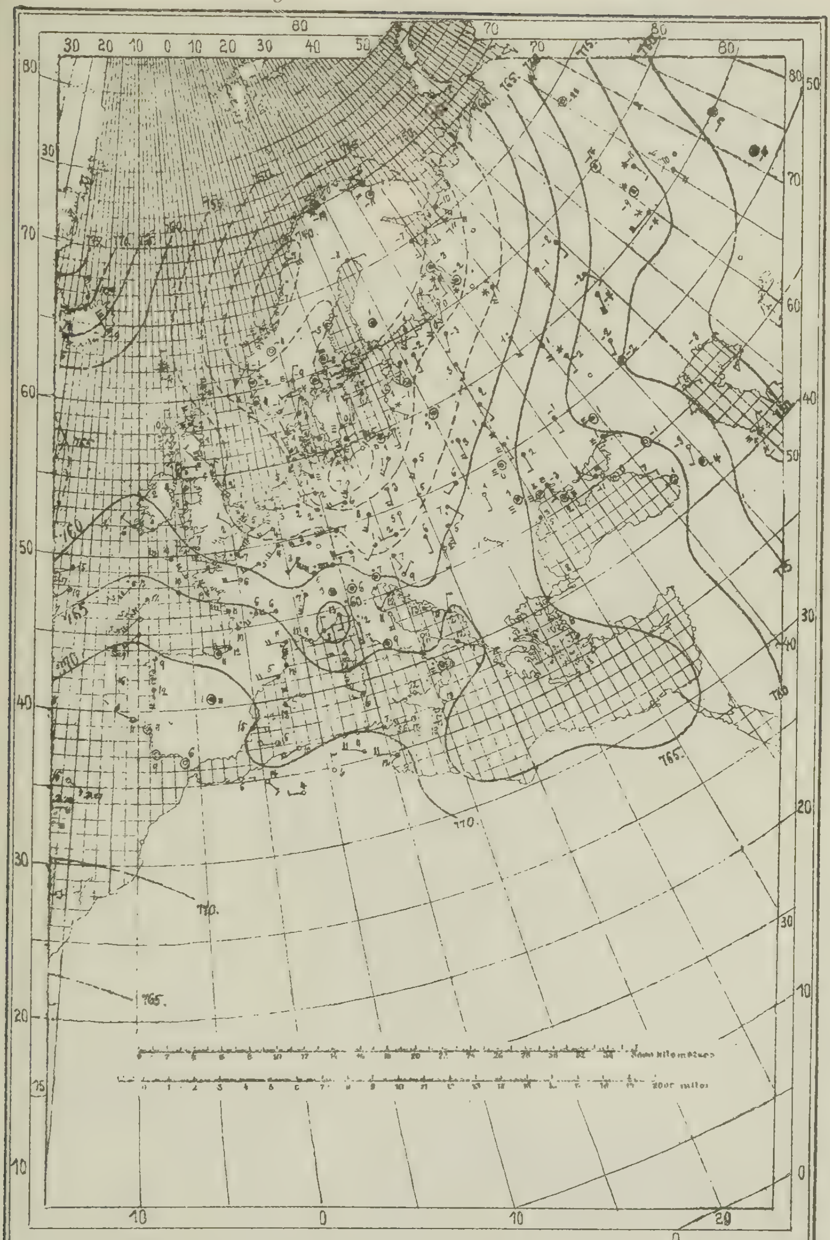


Tafel VII.

20. Dezember 1880. Morgens

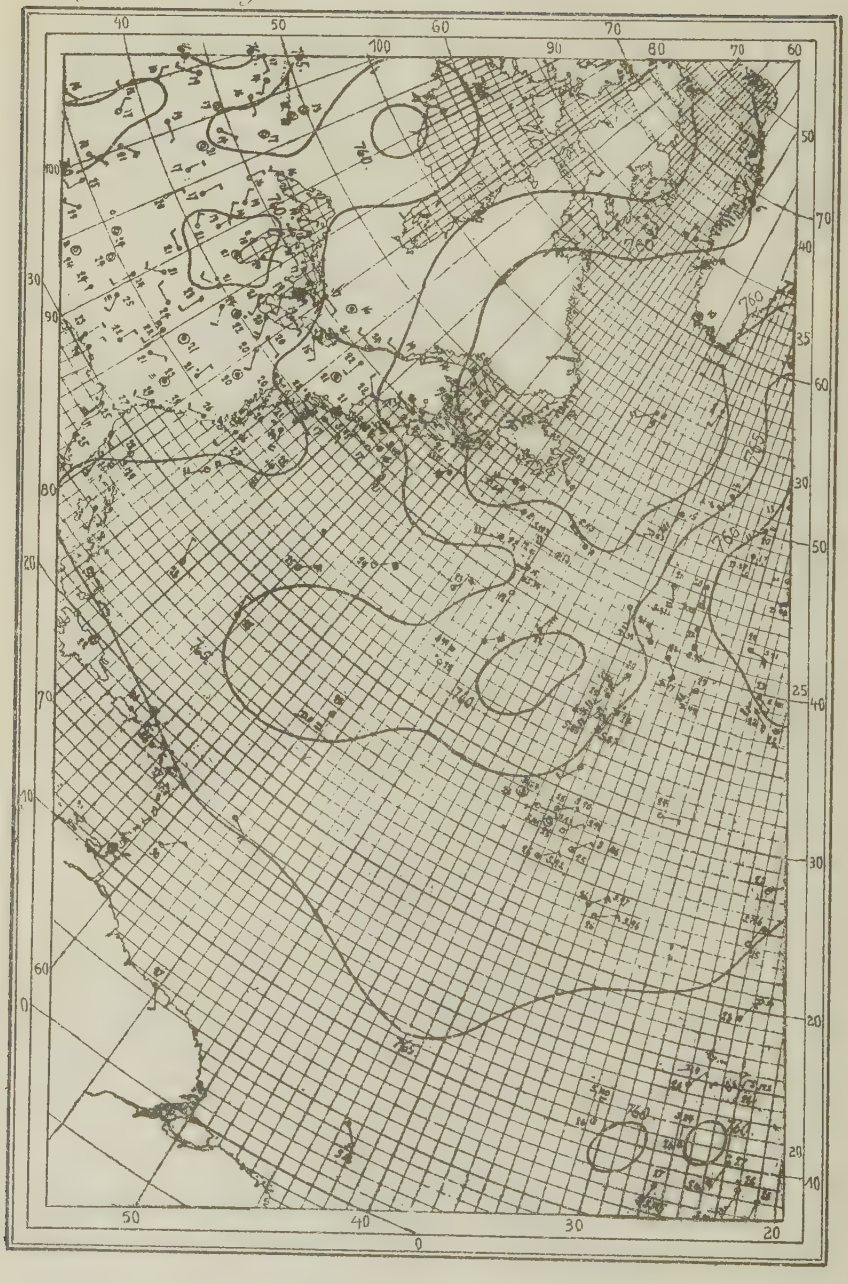


21. Dezember 1880. Morgens.

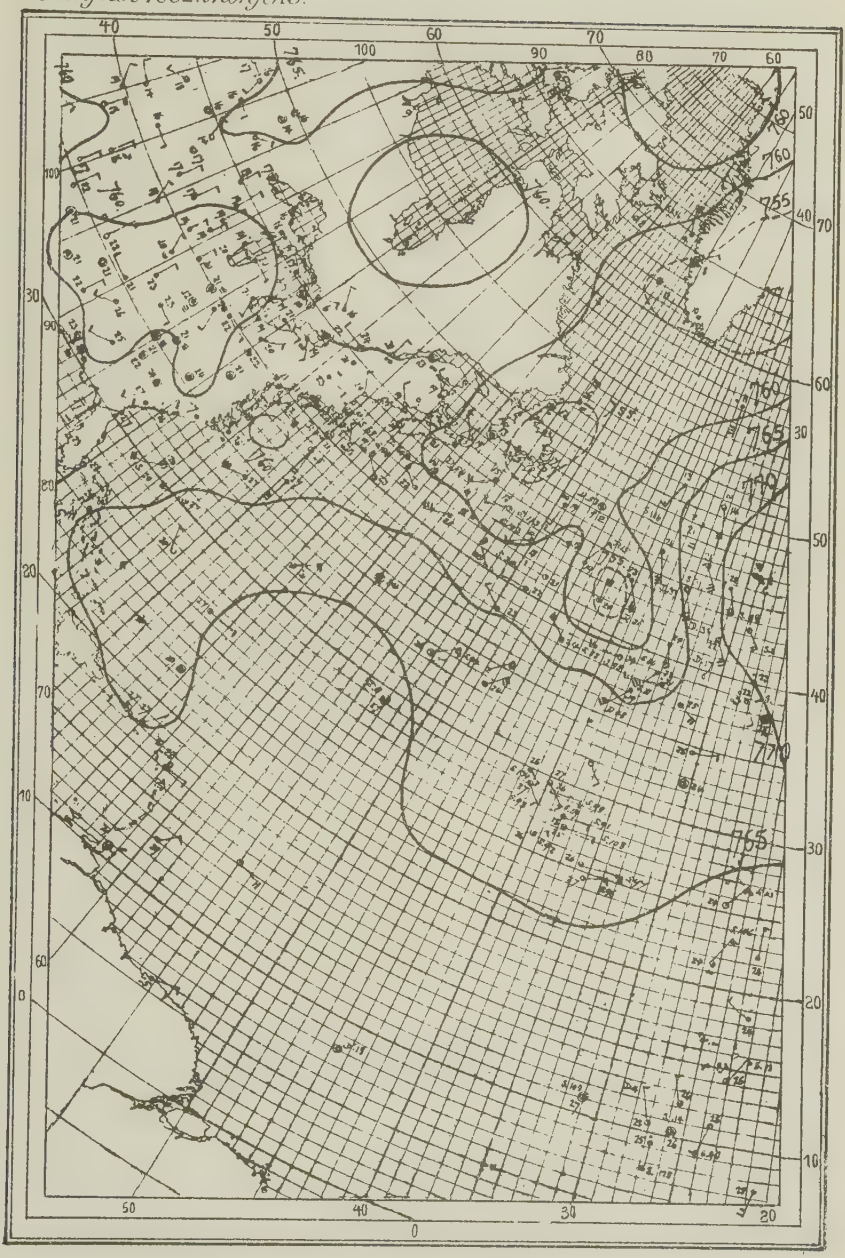


Tafel IX.

2. August 1882. Morgens.

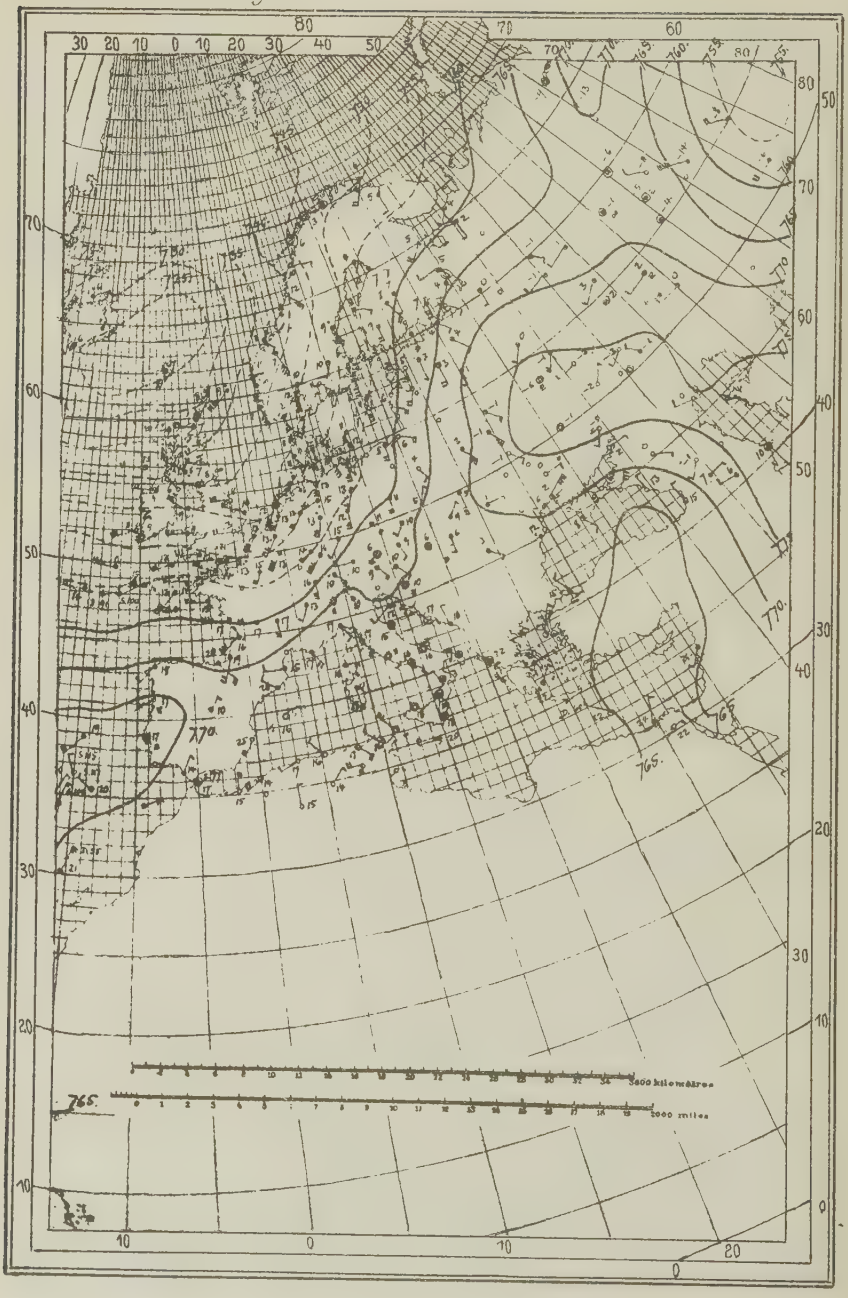


3. August 1882. Morgens.

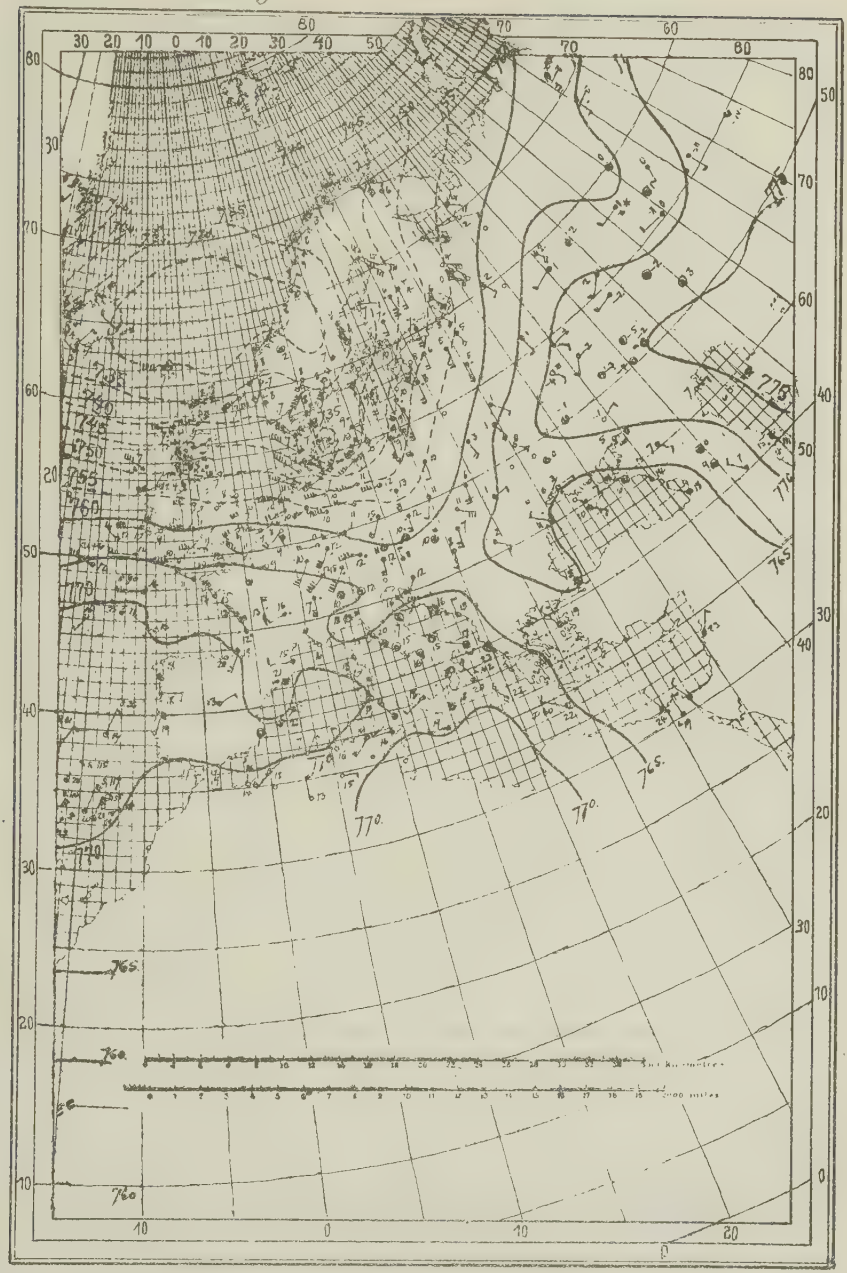


Tafel X.

17. Oktober 1883. Morgens.

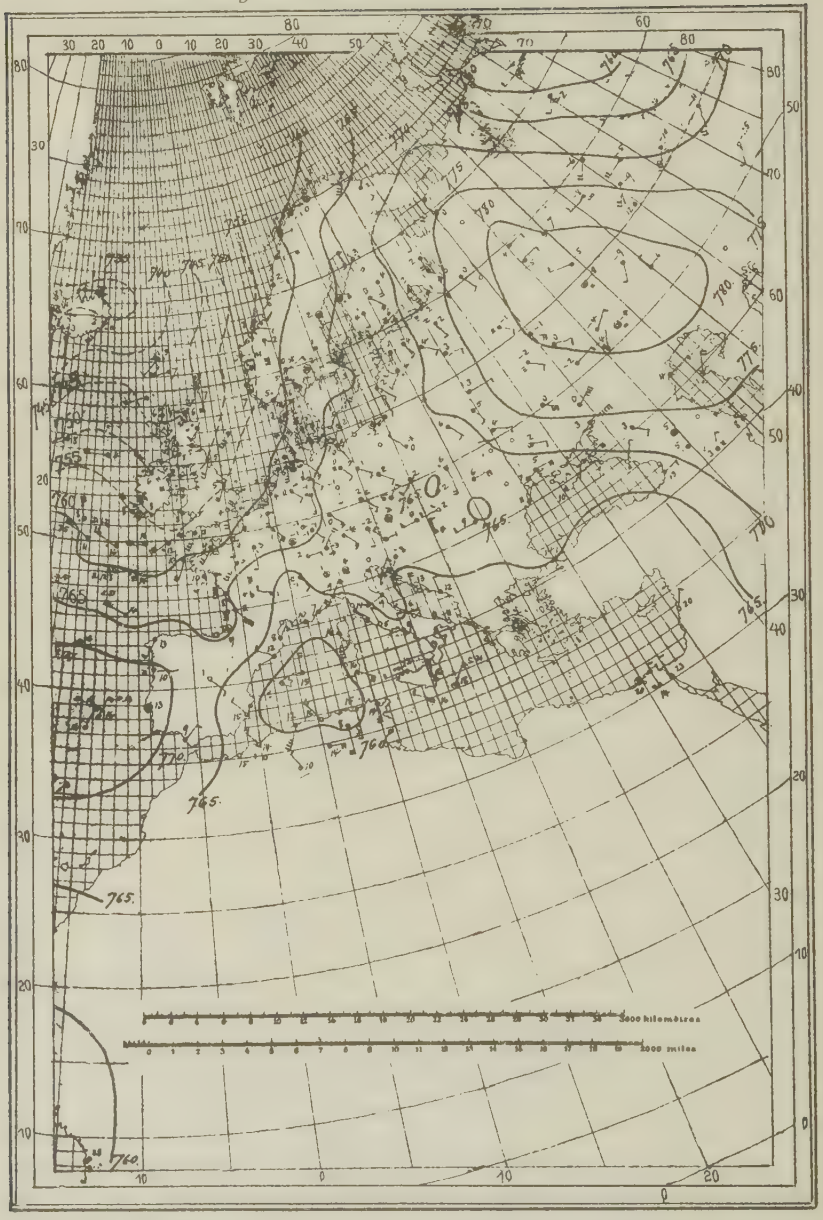


18. Oktober 1883. Morgens.

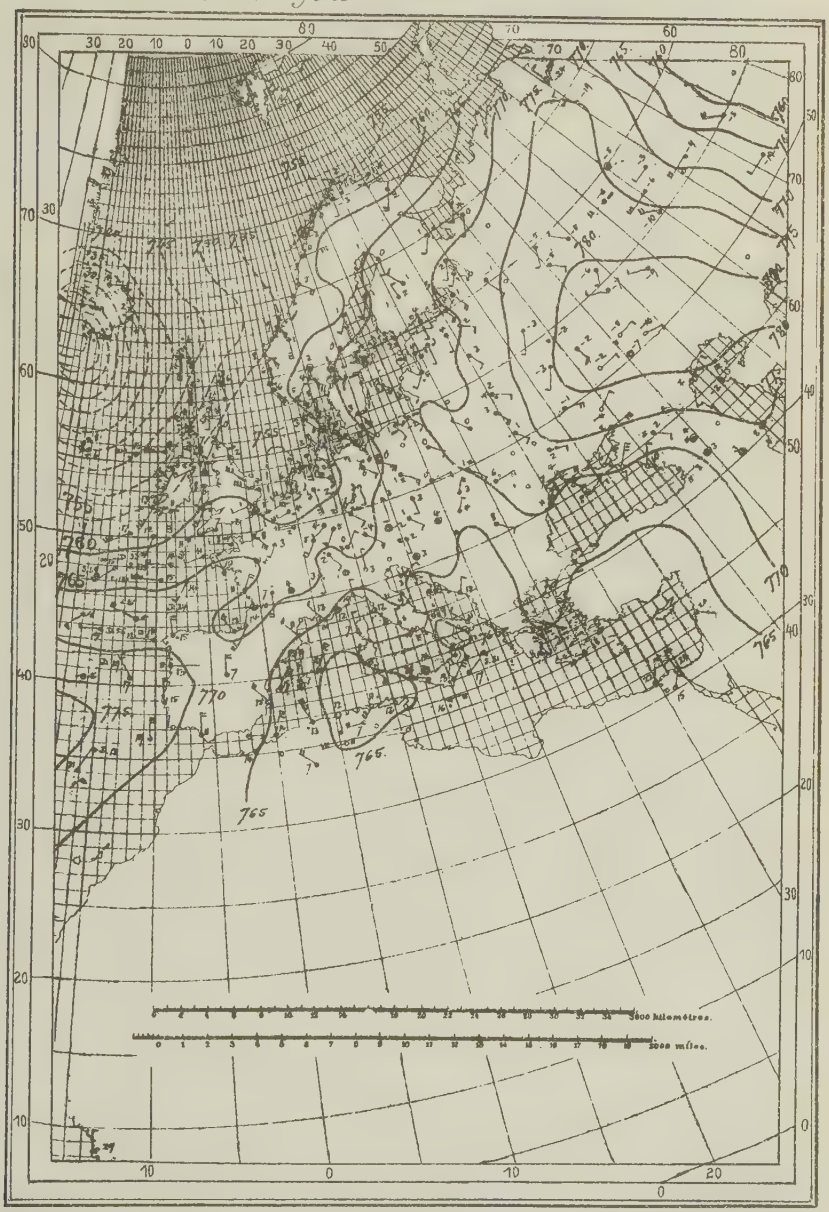


Tafel XI.

17. November 1883. Morgens.

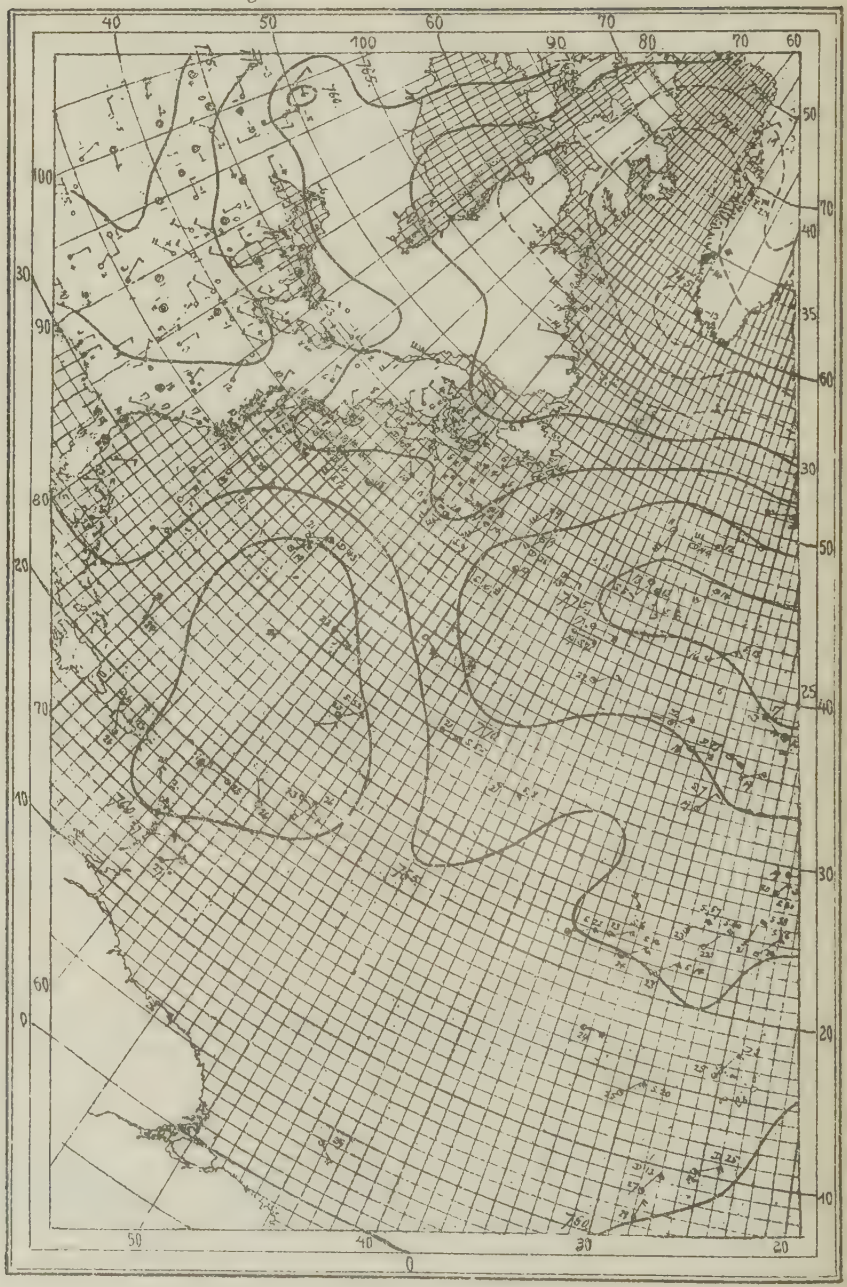


18. November 1883. Morgens

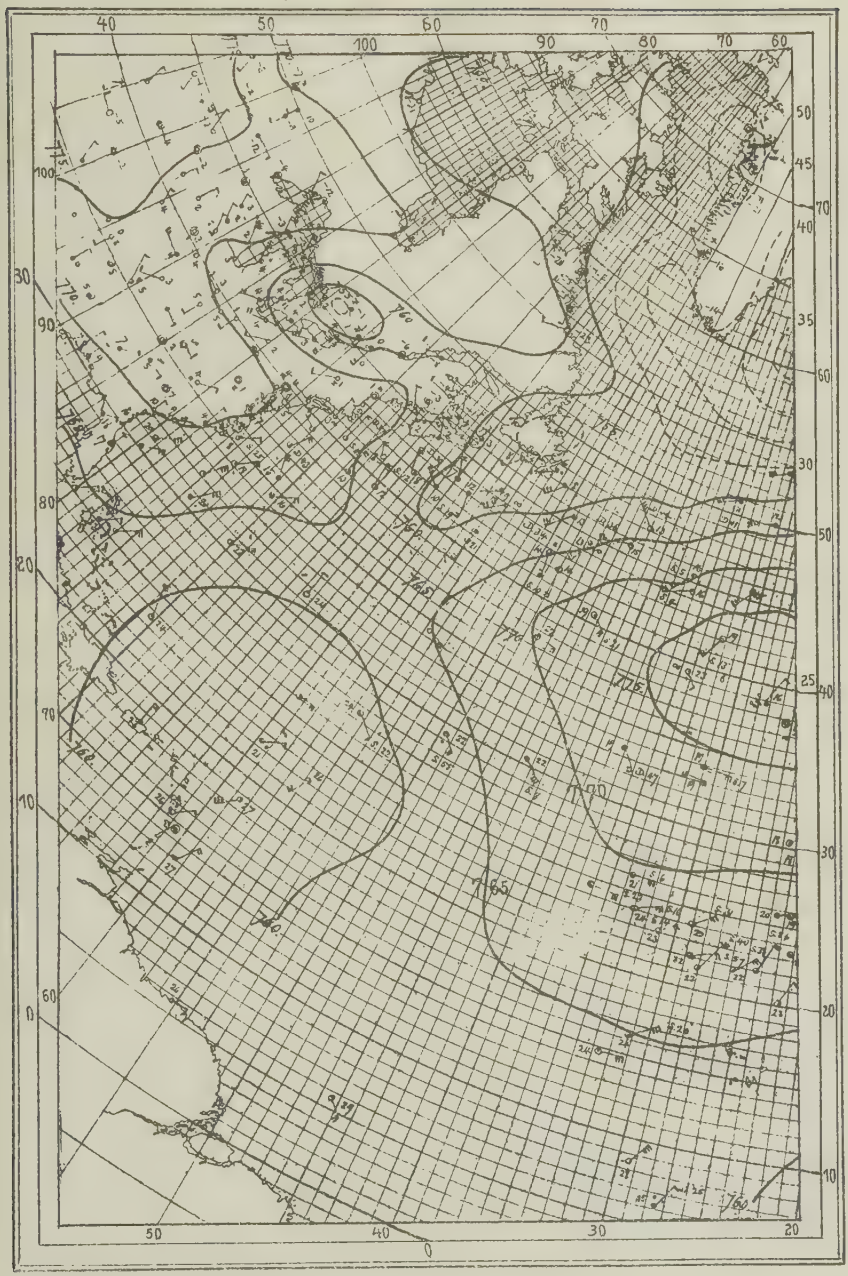


Tafel XII.

9. Dezember 1883. Morgens.

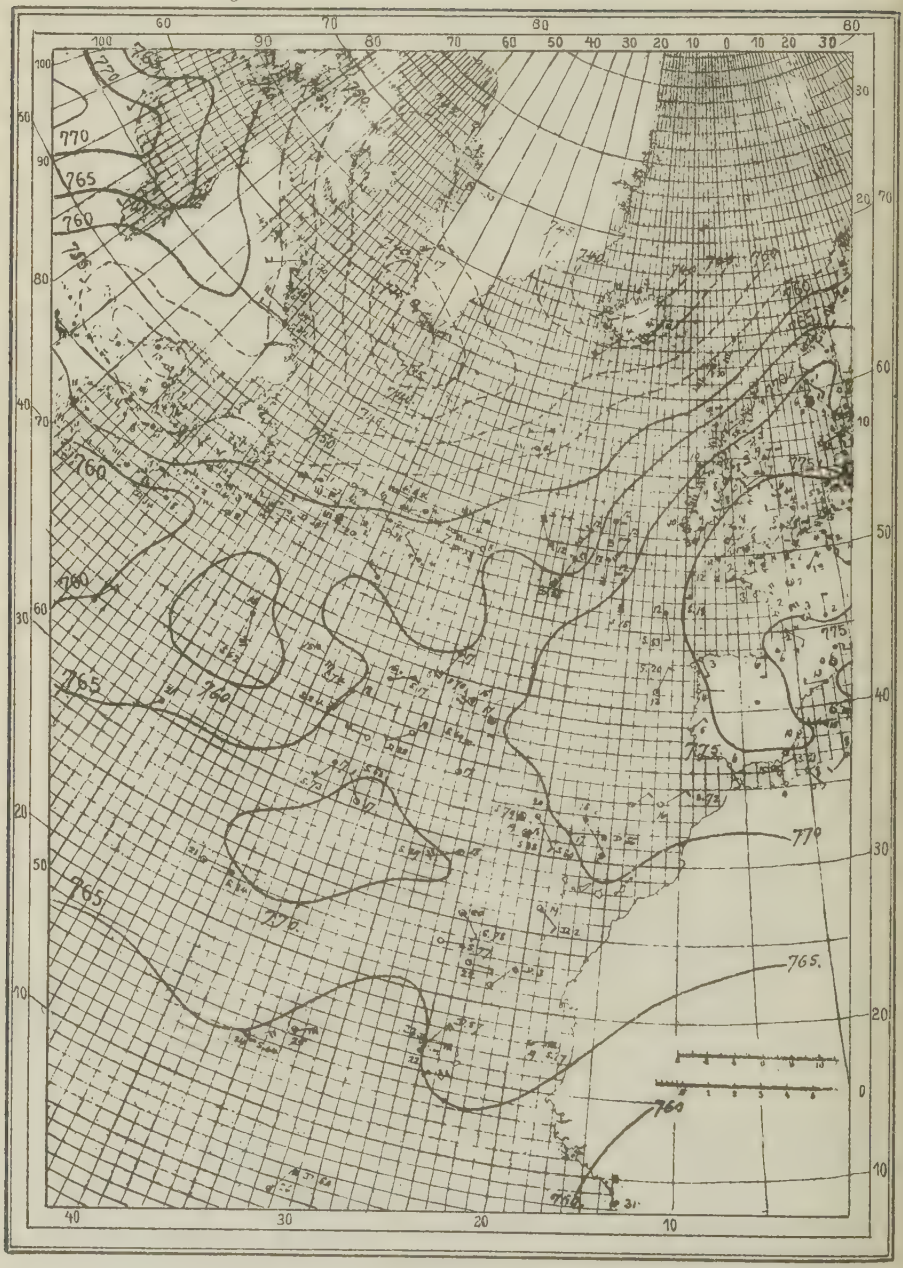


10. Dezember 1883. Morgens.

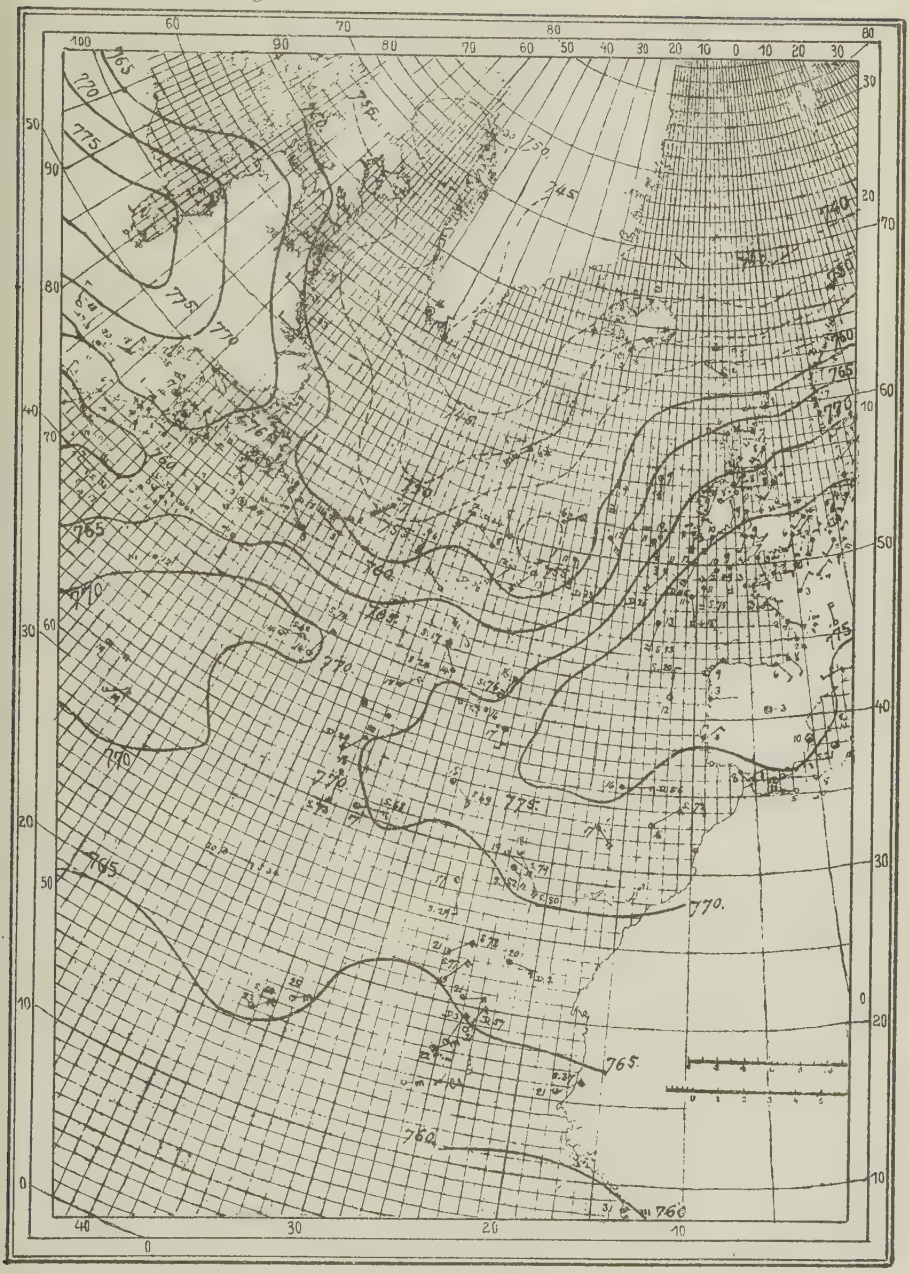


Tafel XIII.

18. Januar 1884. Morgens.

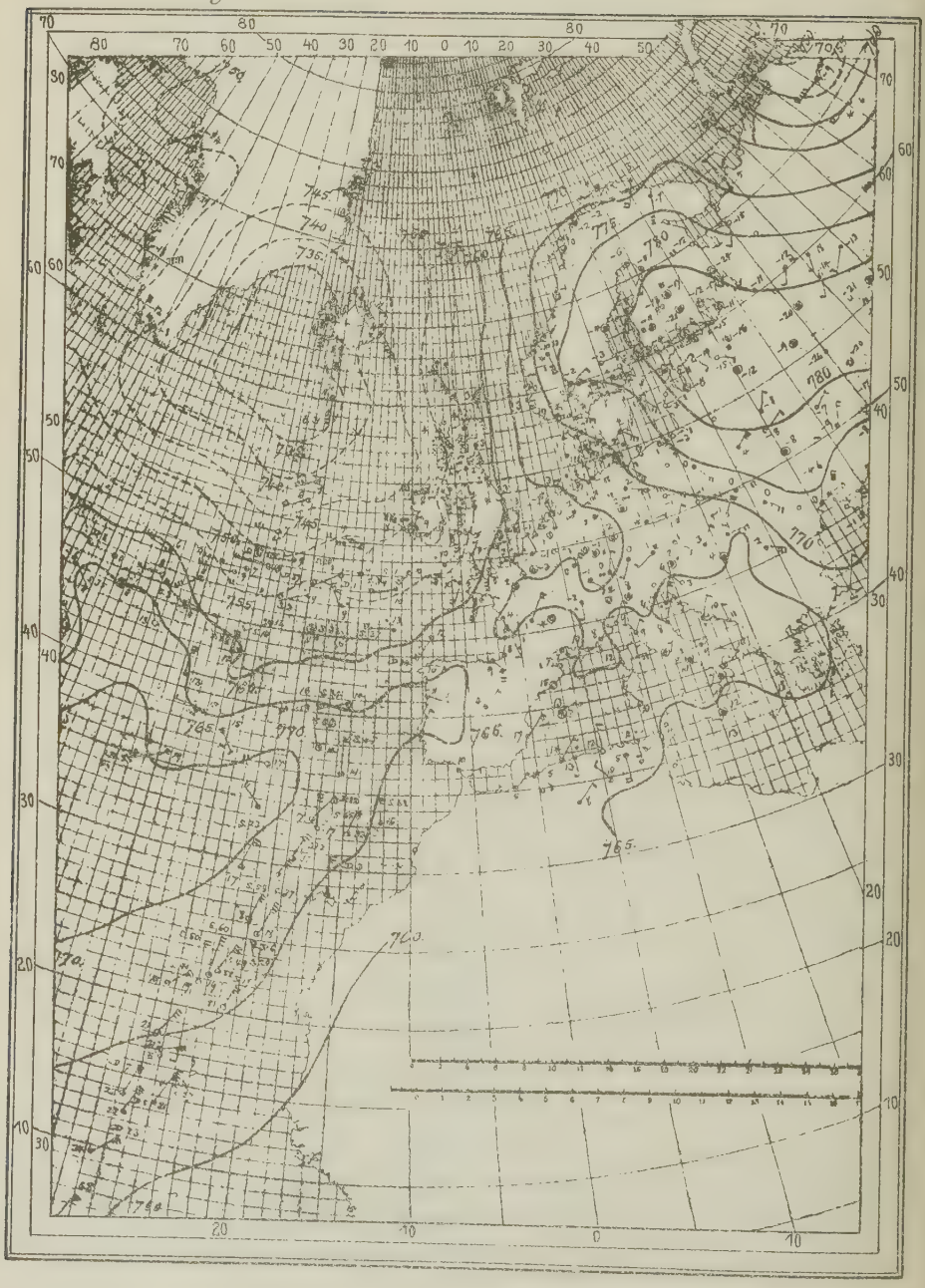


19. Januar 1884. Morgens.

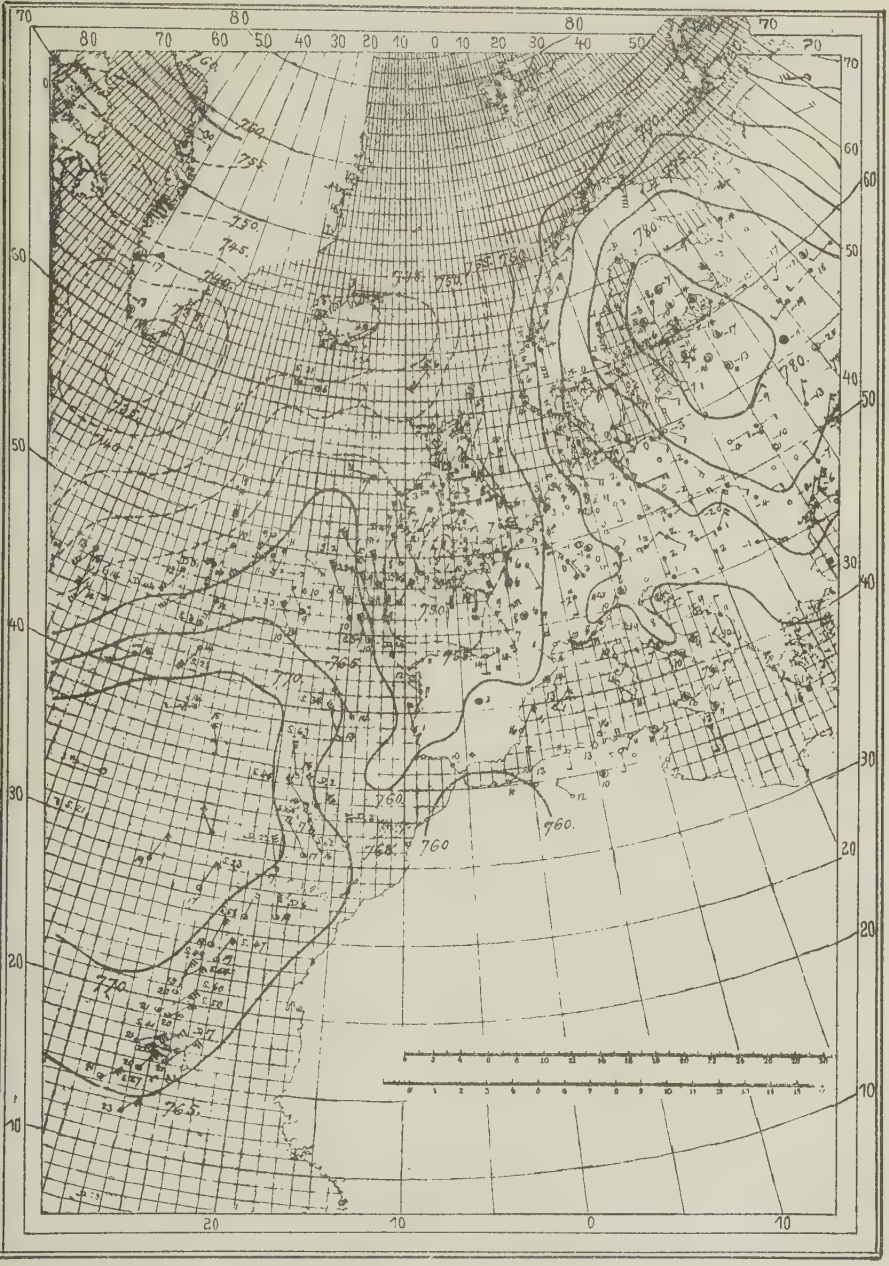


Tafel XIV.

3. März 1884. Morgens.

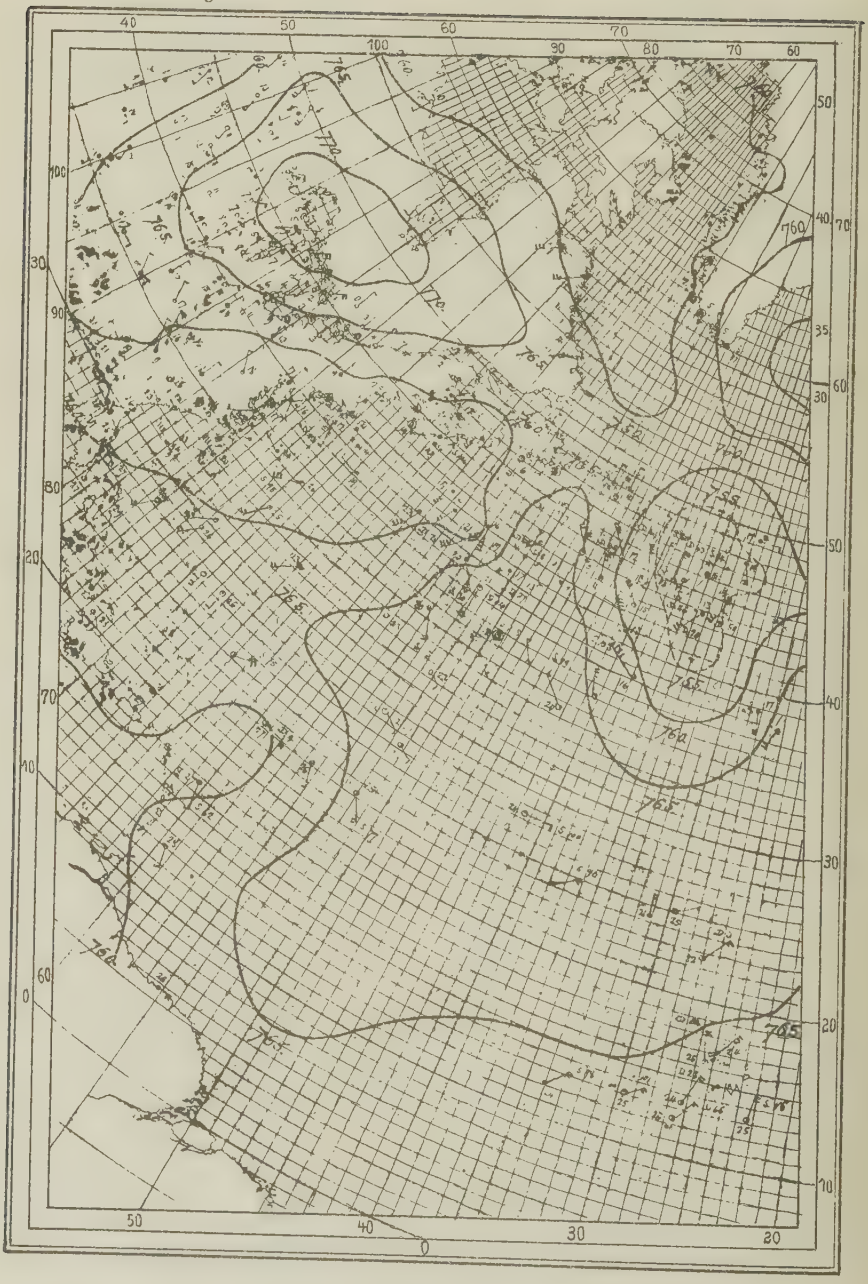


4. März 1884. Morgens.

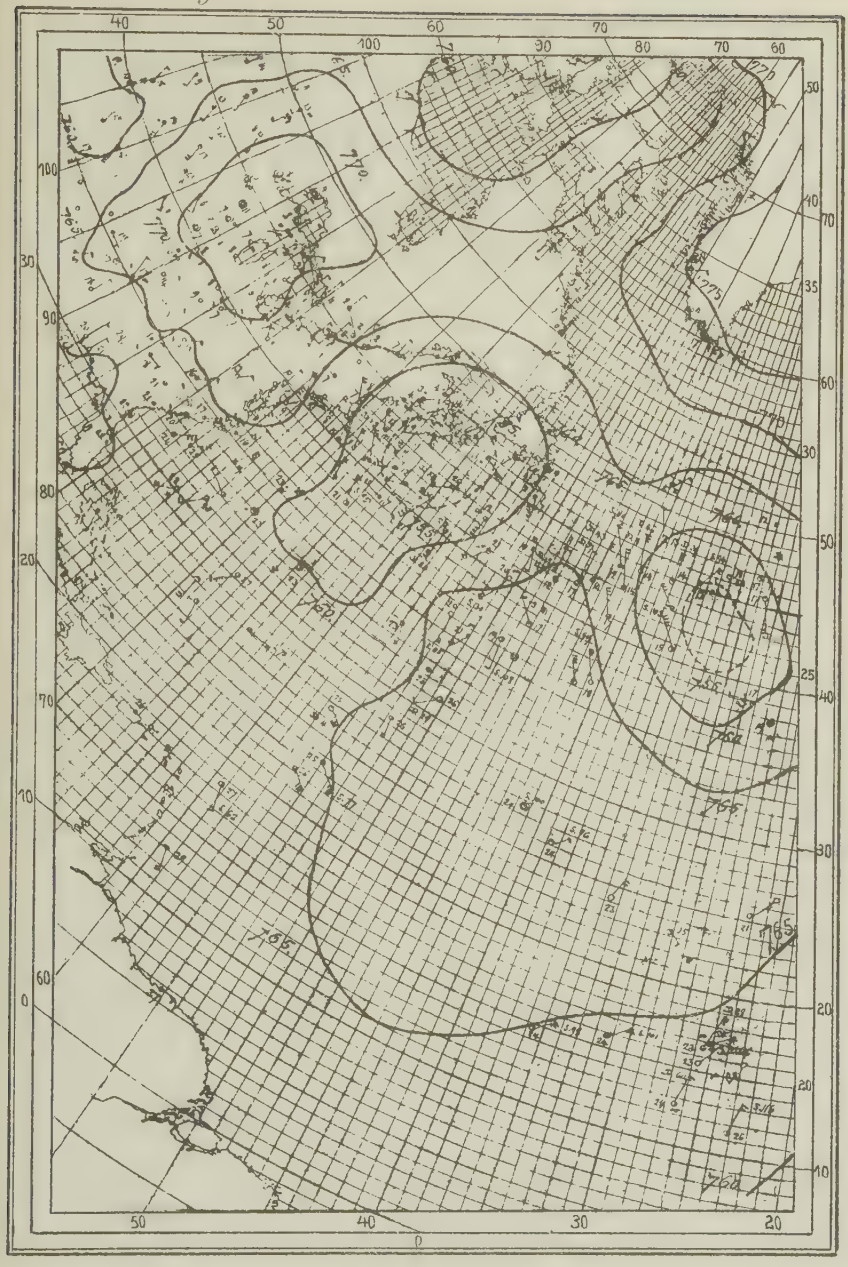


Tafel XV.

28. Mai 1884. Morgens.

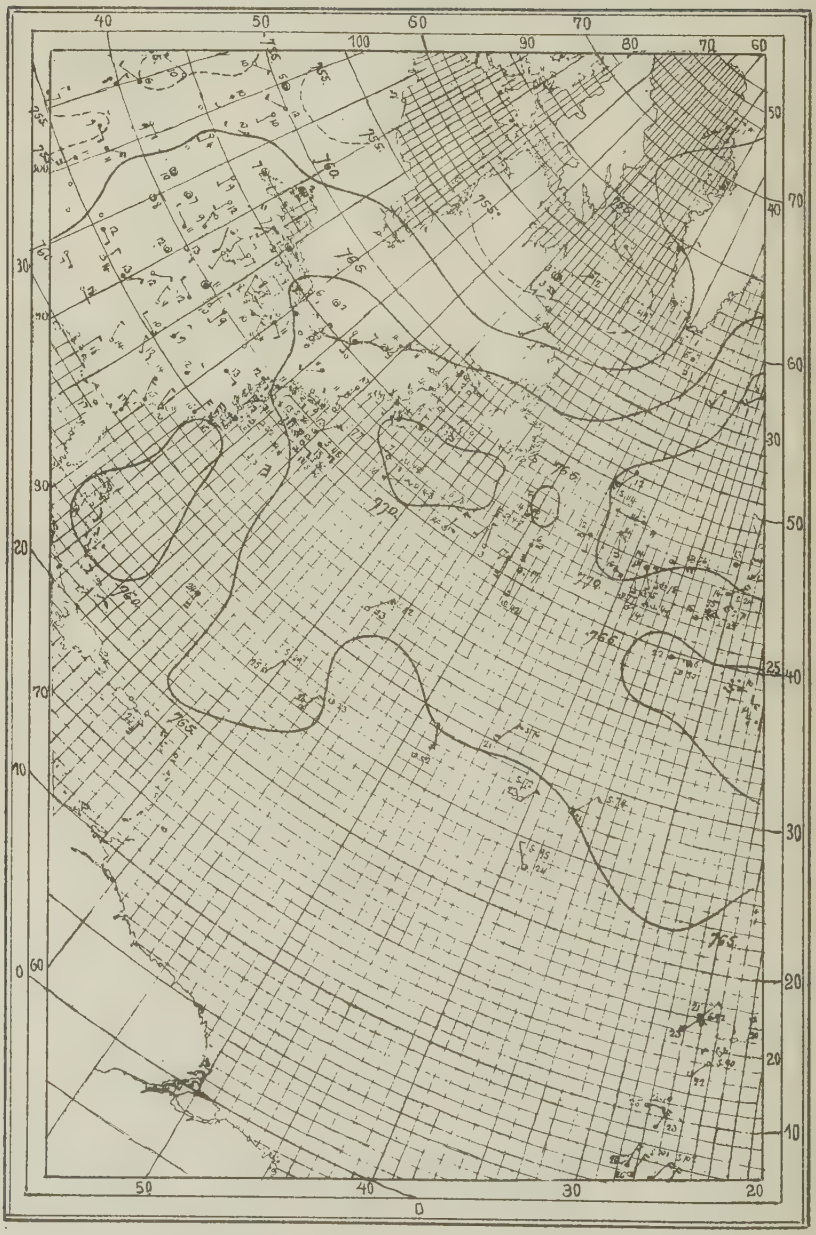


29. Mai 1884. Morgens.

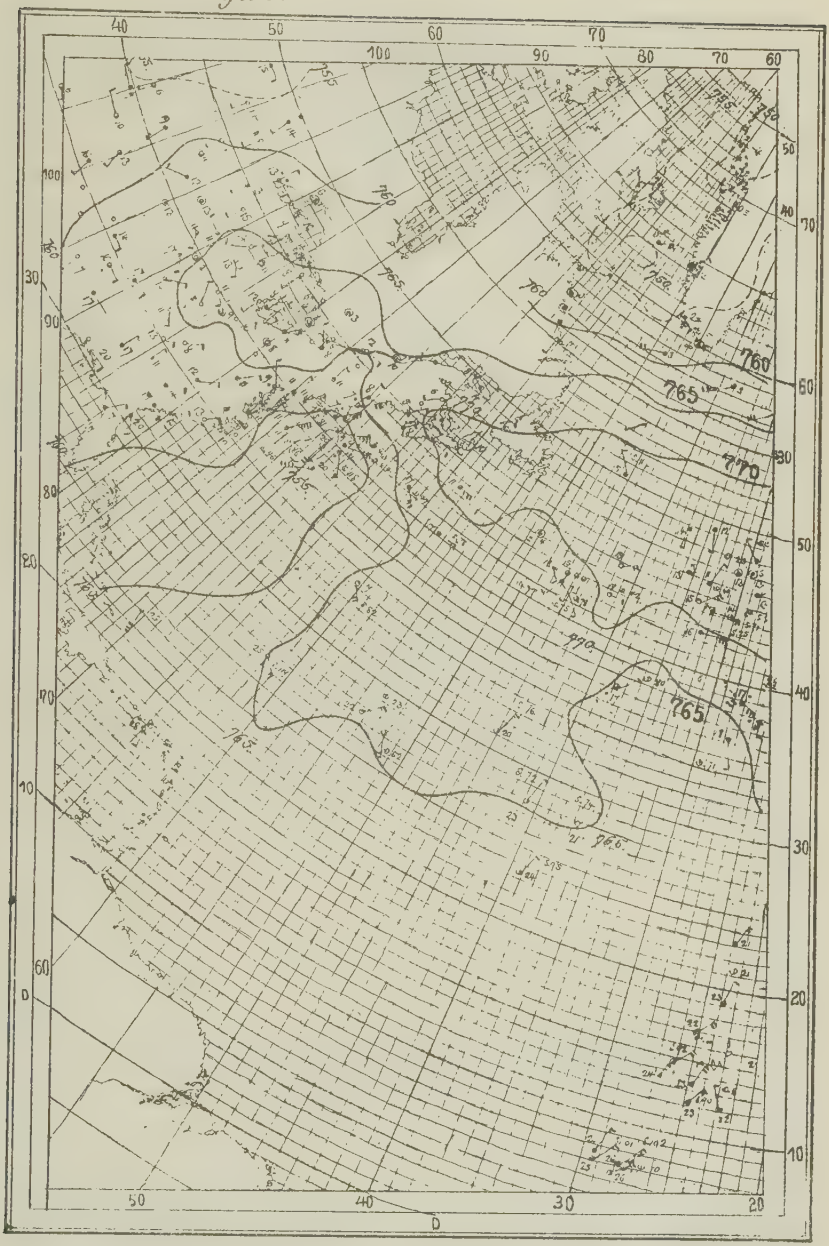


Tafel XVI.

13. Mai 1885. Morgens.

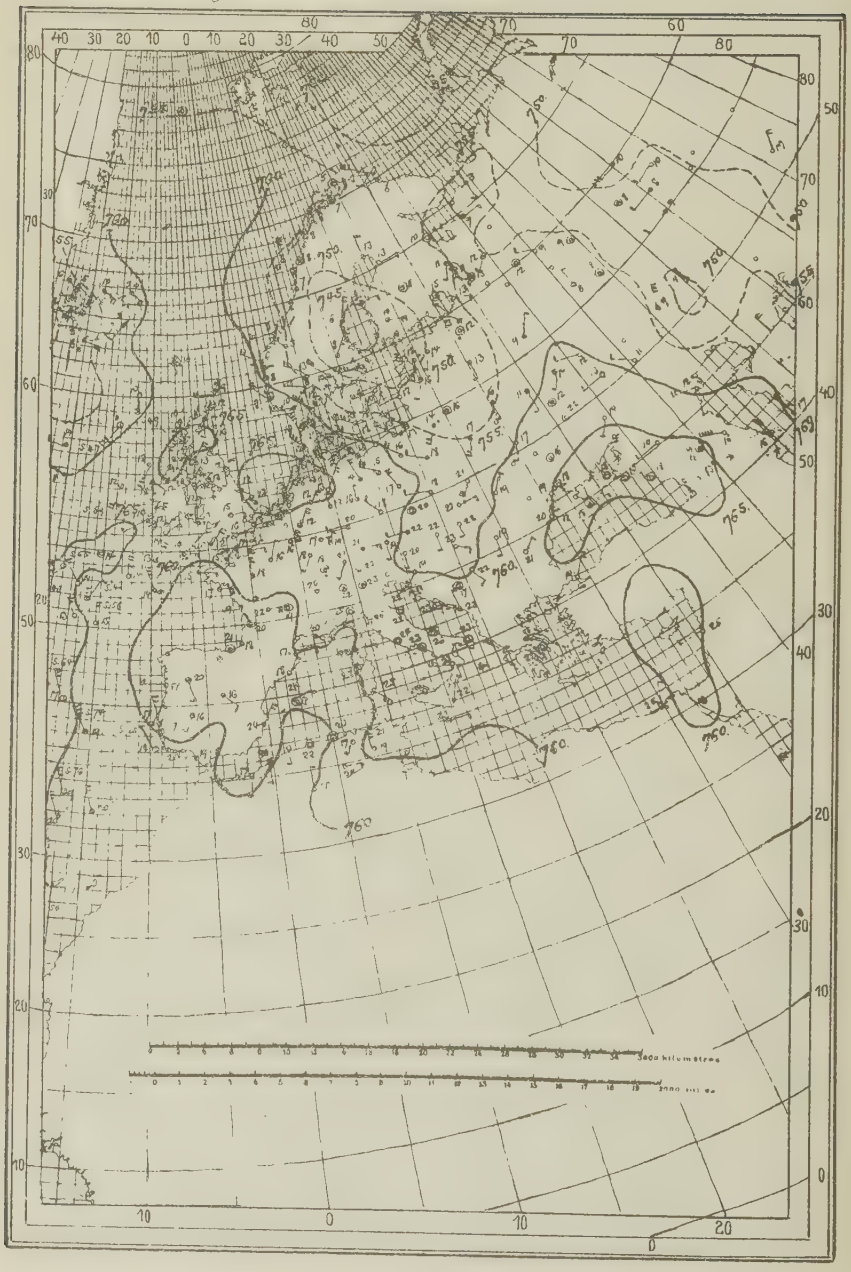


14. Mai 1885. Morgens.

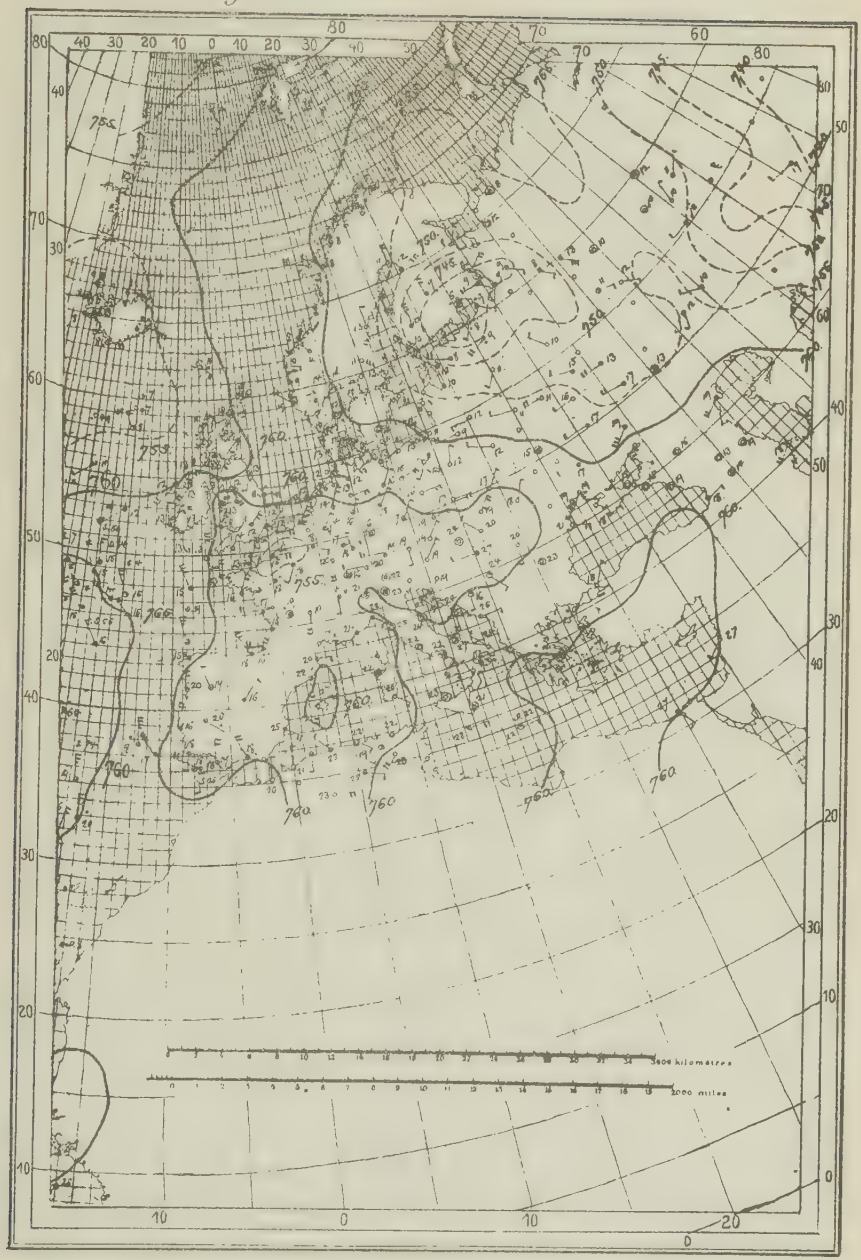


Tafel XVII.

16. Juni 1885. Morgens.

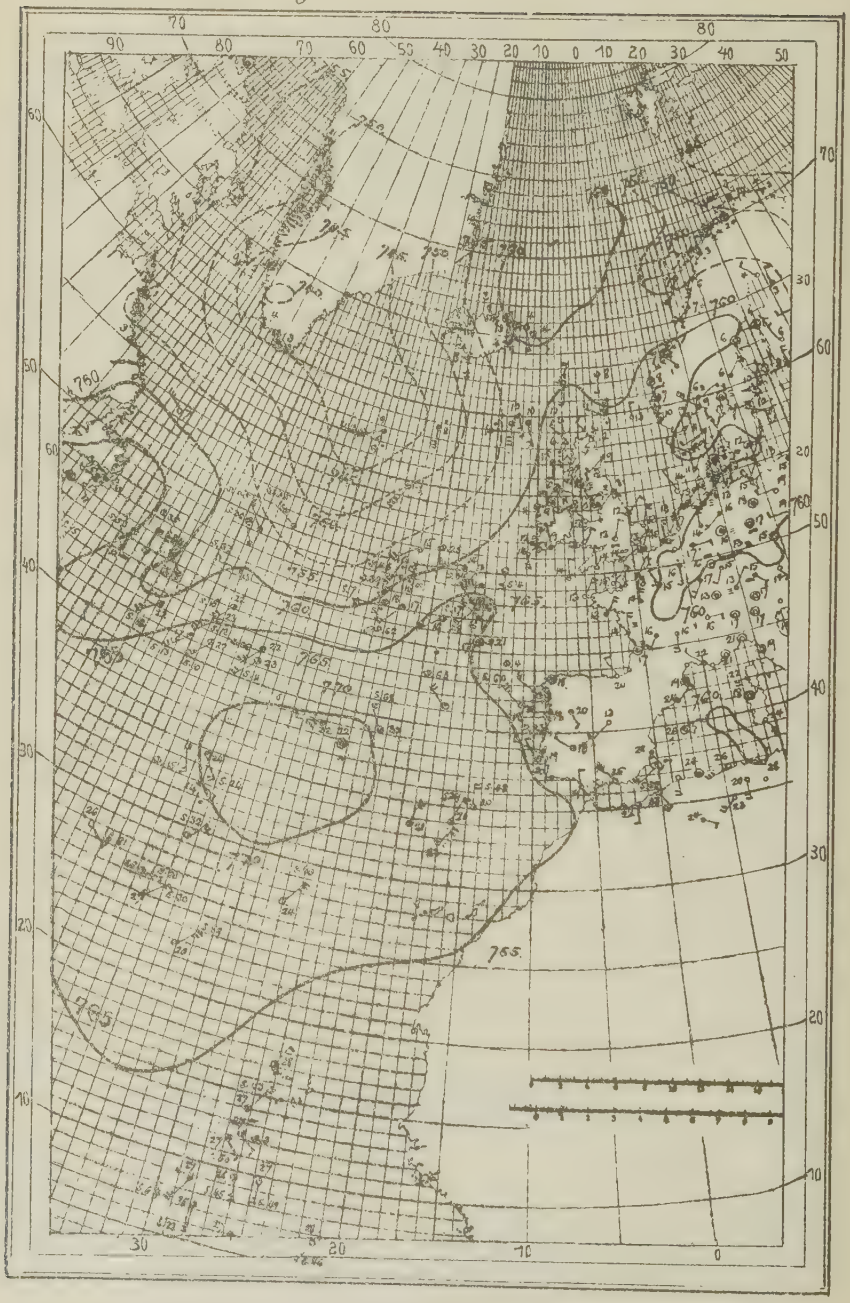


17. Juni 1885. Morgens.

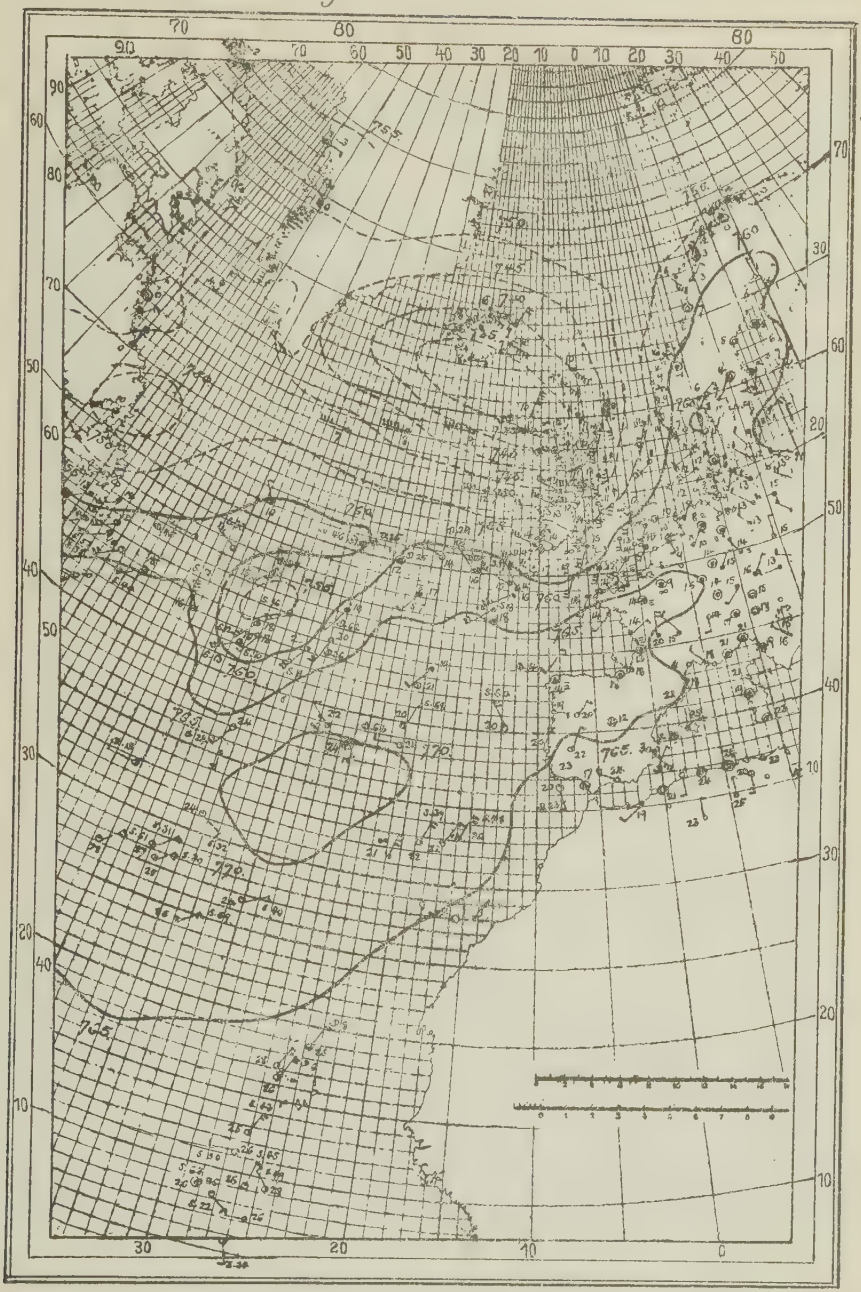


Tafel XVIII.

18. September 1885. Morgens.

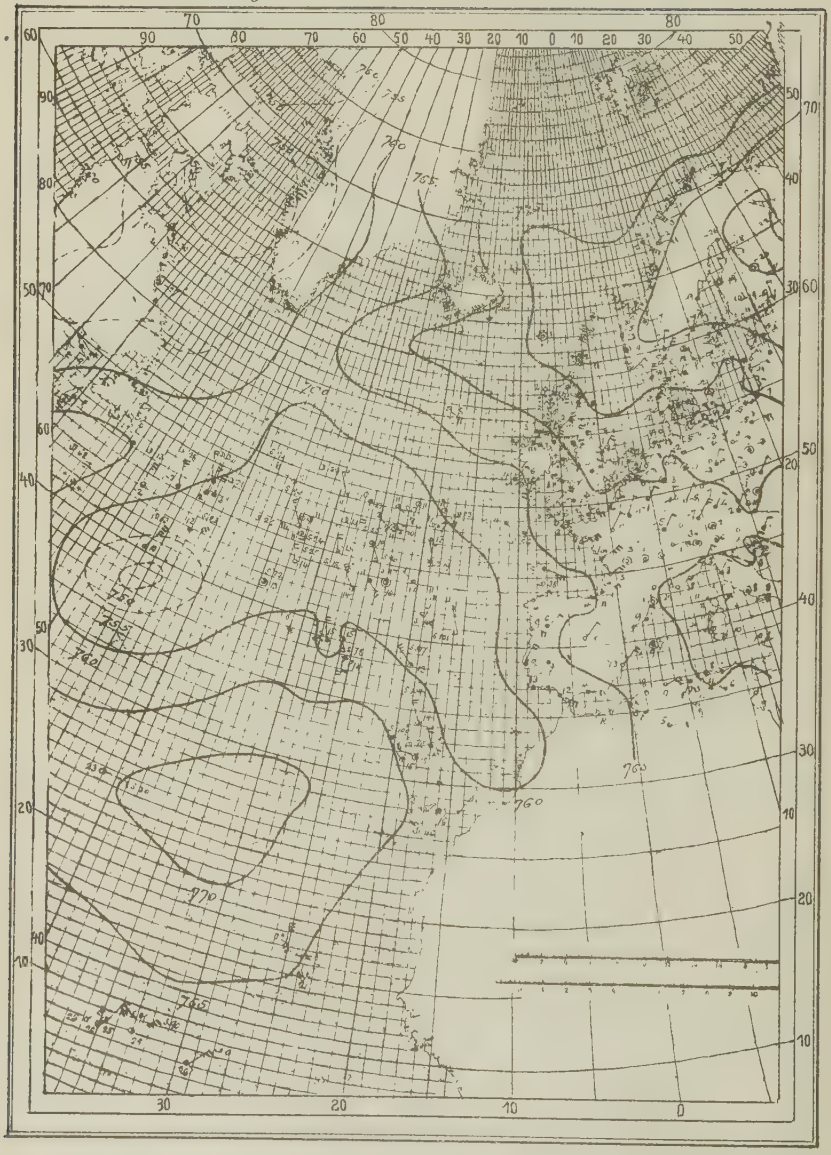


19. September 1885. Morgens.

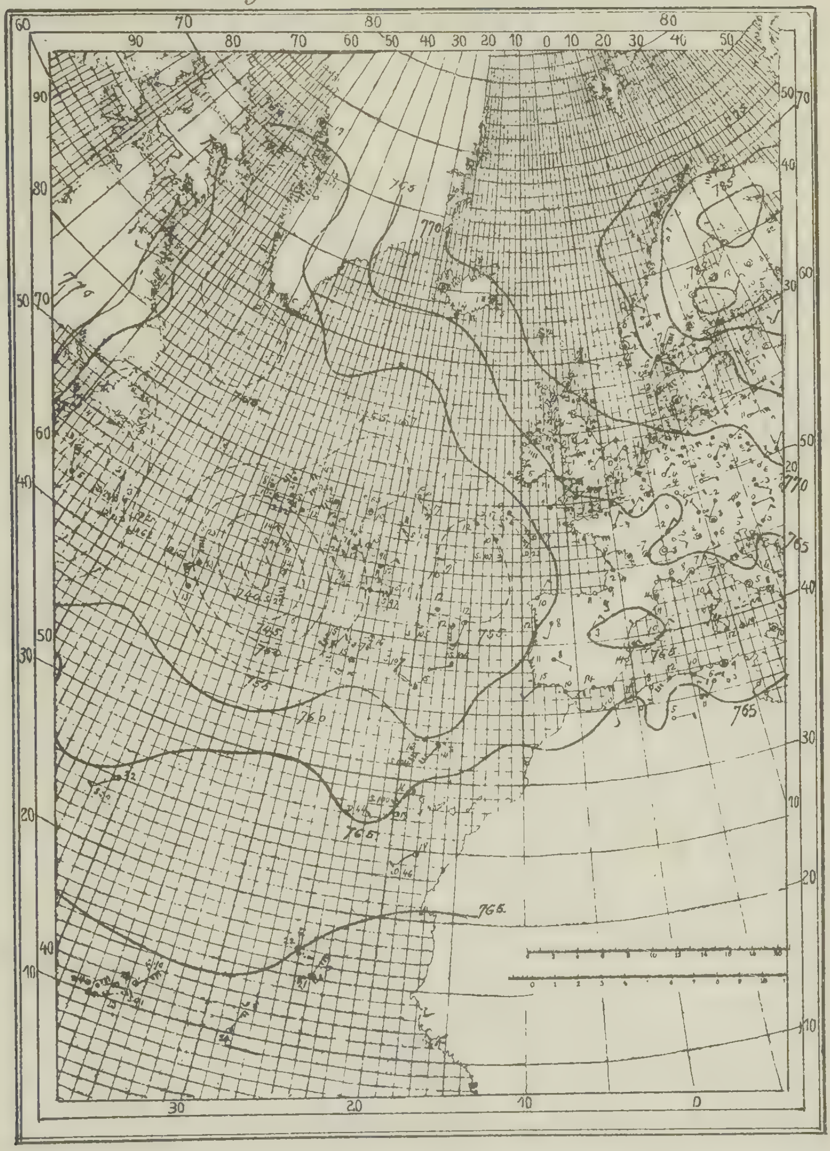


Tafel XIX.

23. Februar 1886. Morgens.

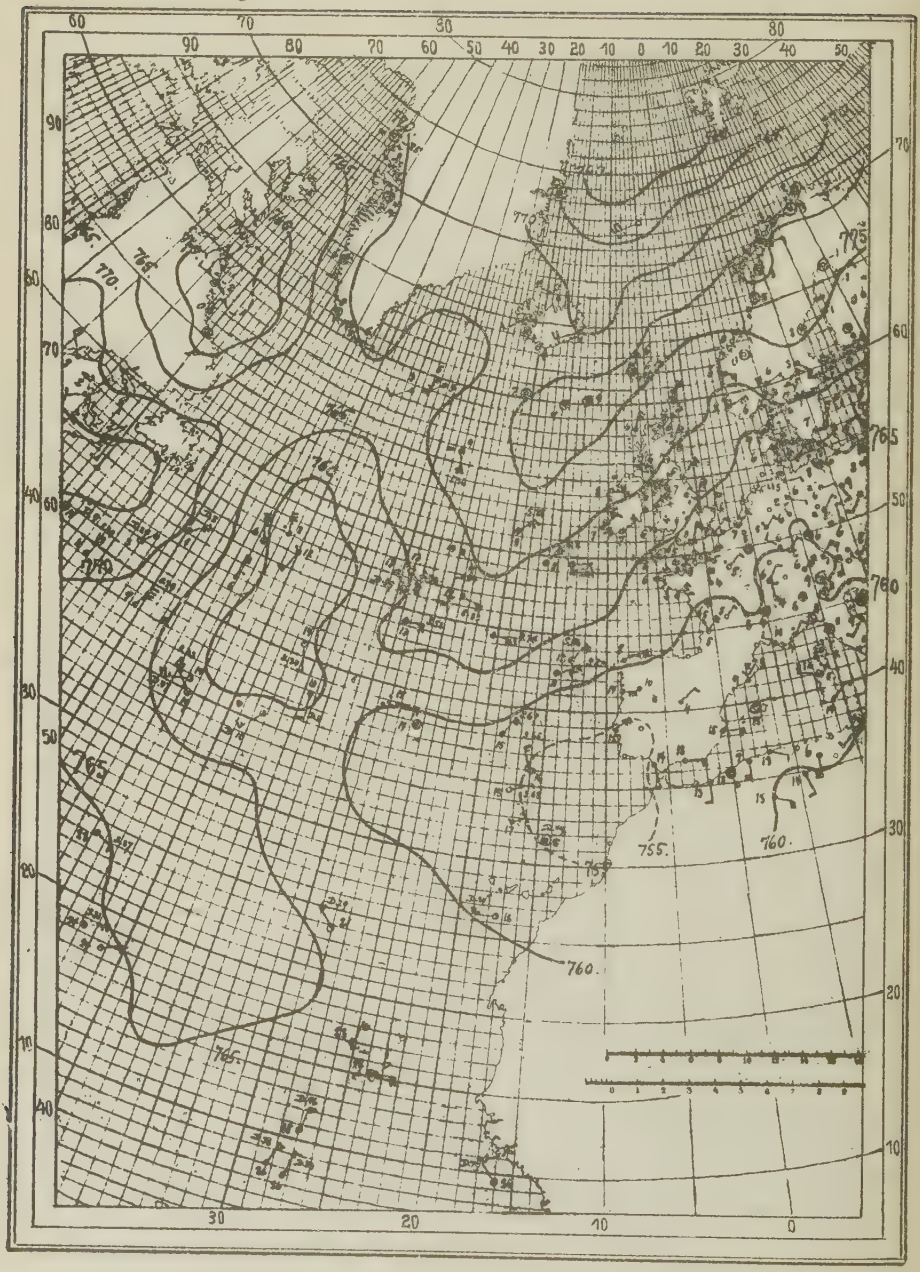


24. Februar 1886. Morgens.

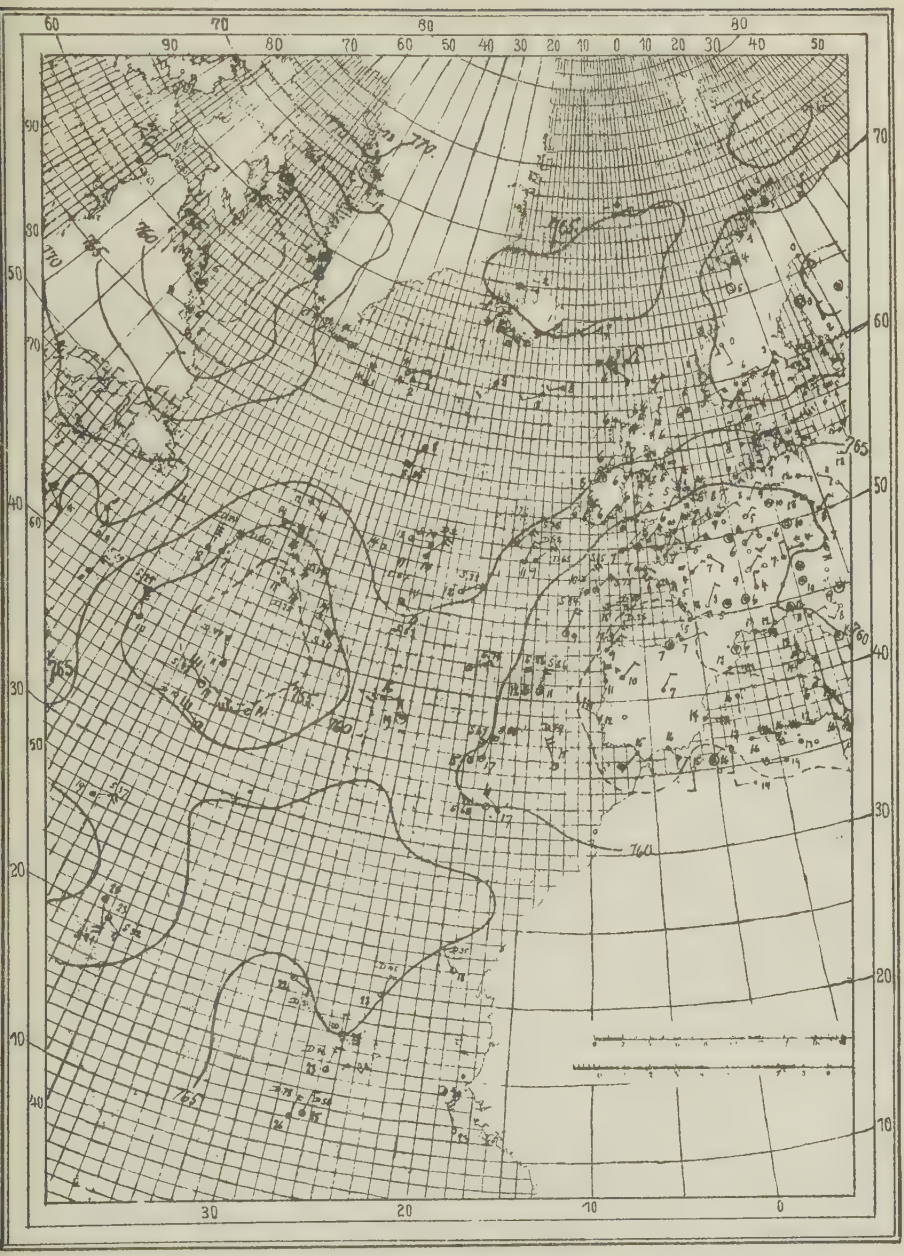


Tafel XX.

17. April 1886. Morgens.

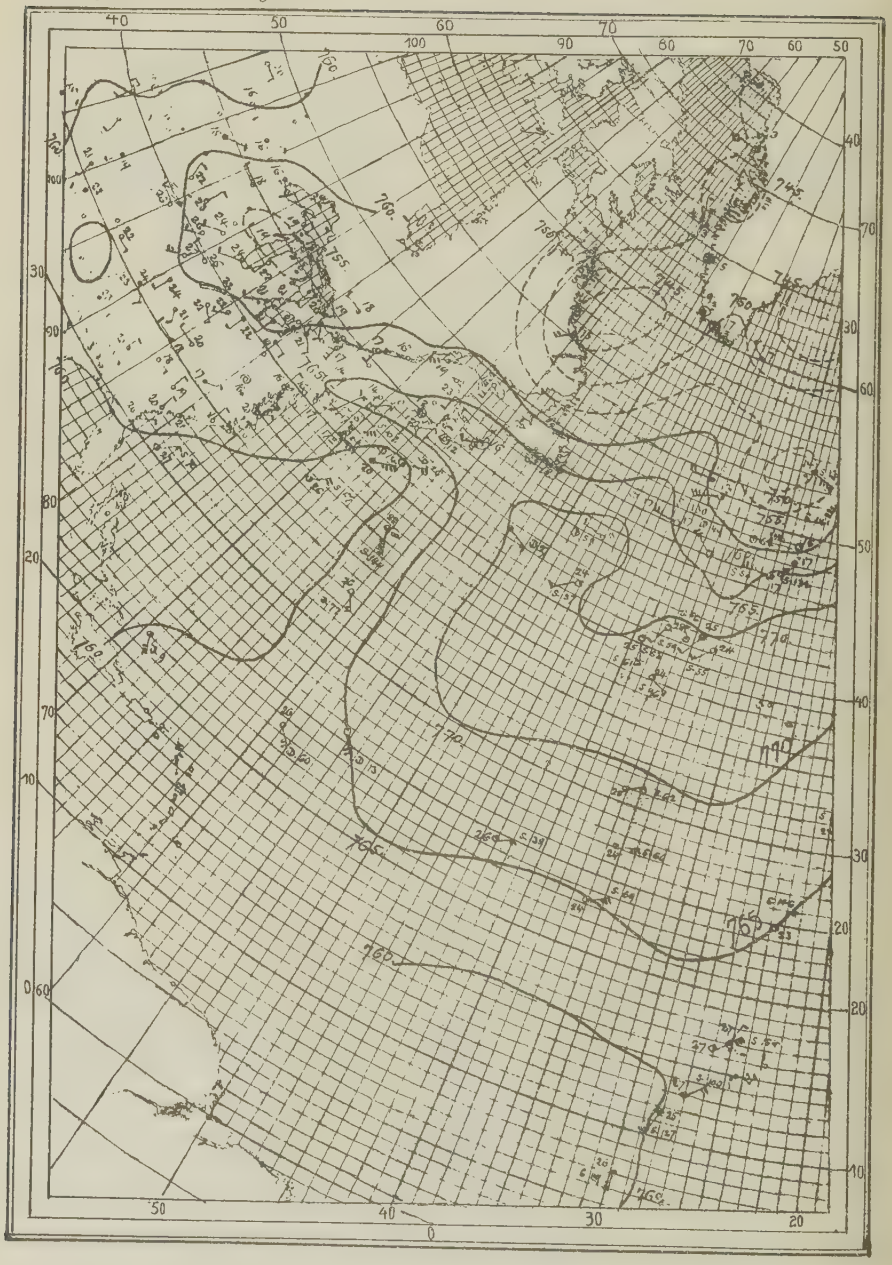


18. April 1886. Morgens.

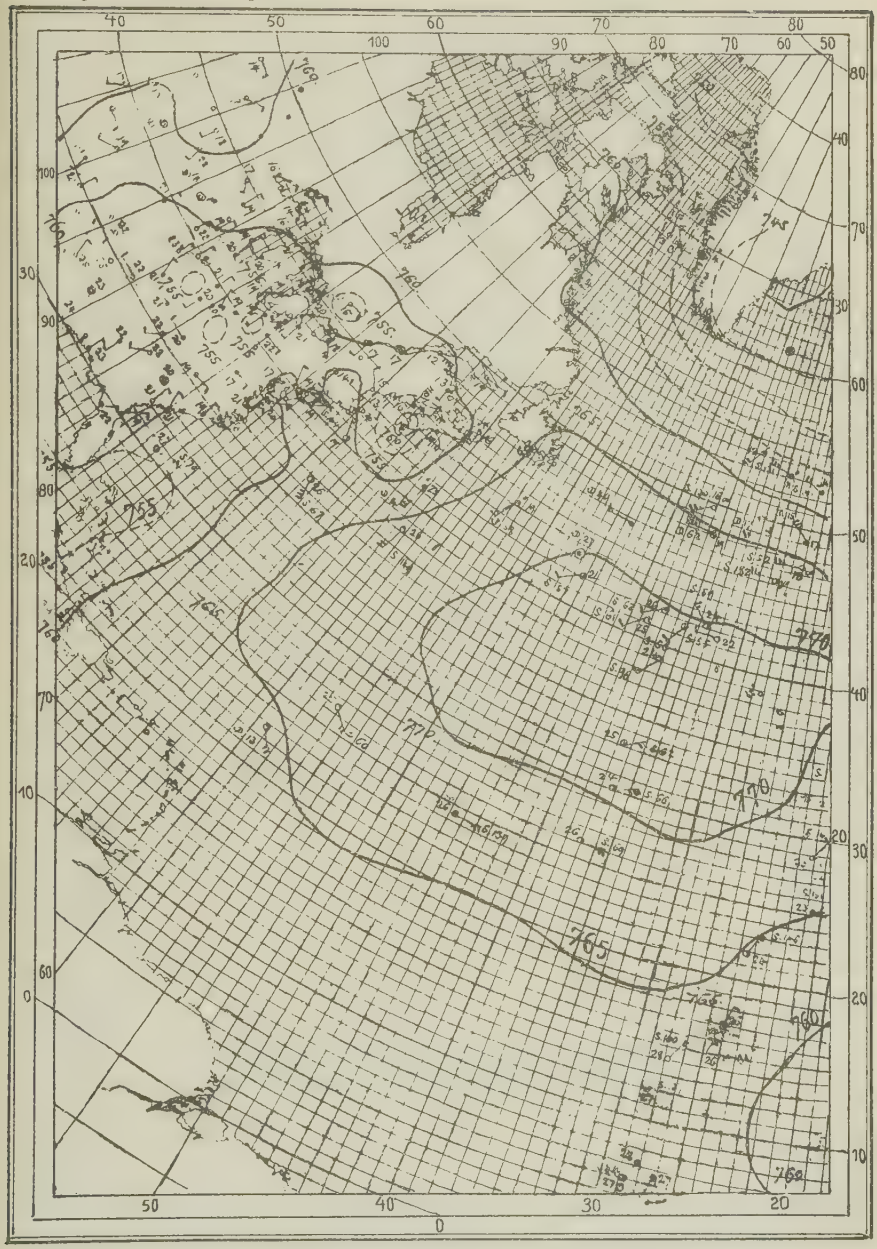


Tafel XXI.

22. August 1886. Morgens

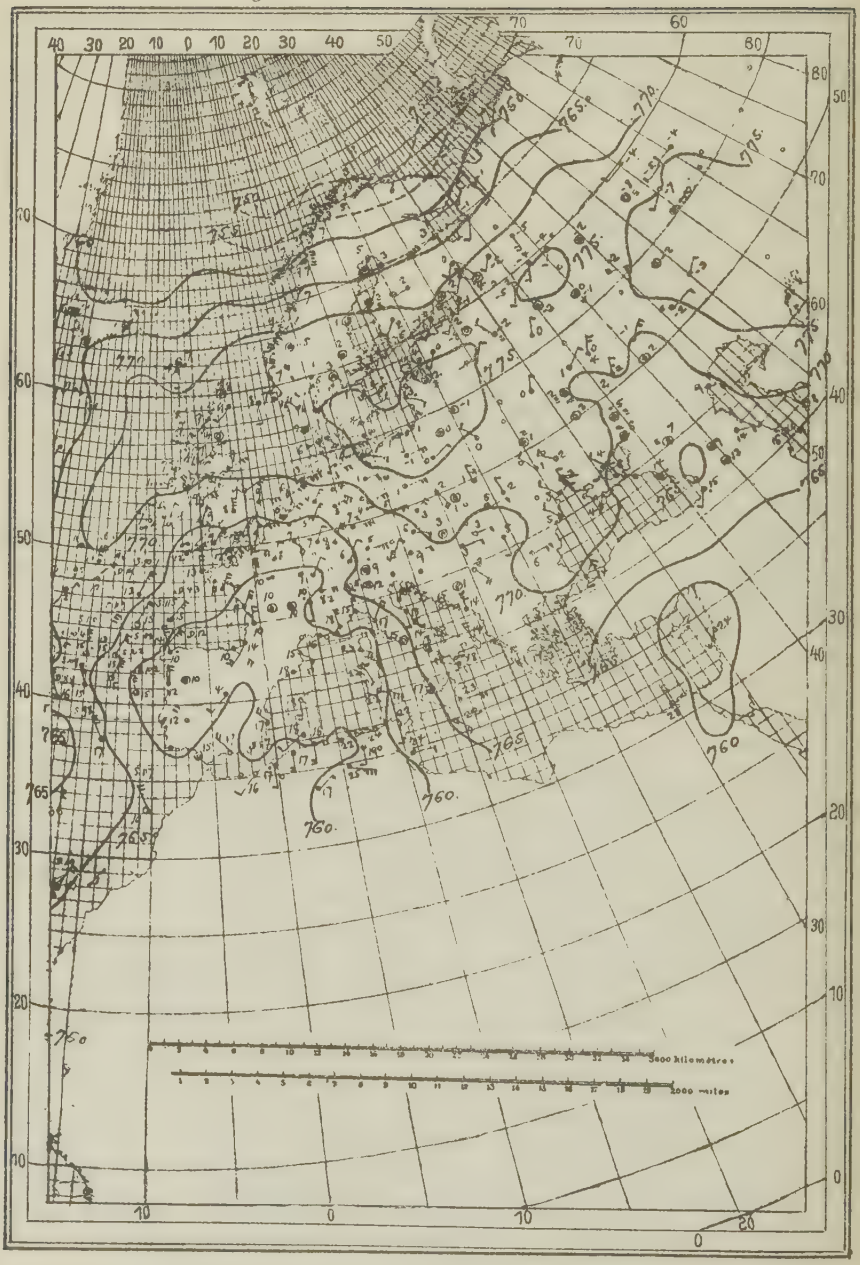


23. August 1886. Morgens

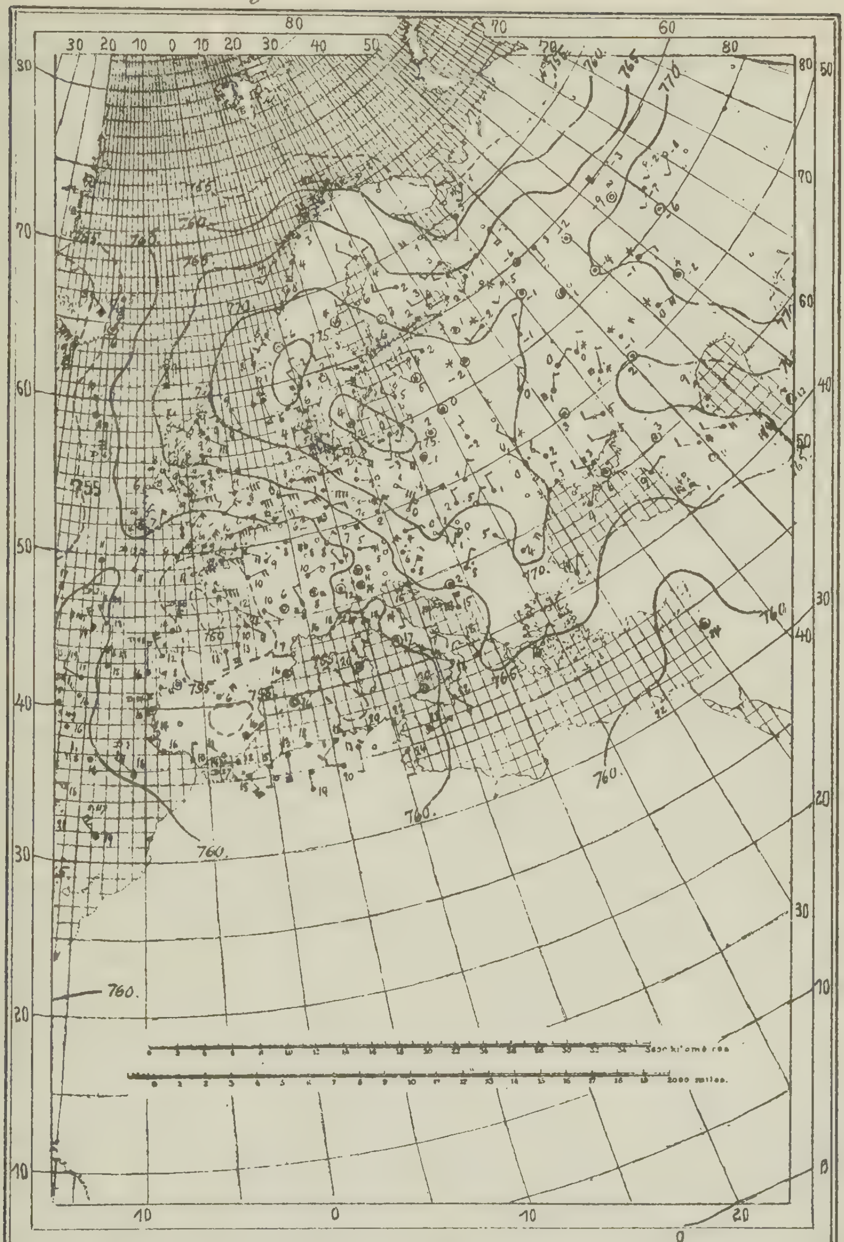


Tafel XXII.

26. Oktober 1886. Morgens.

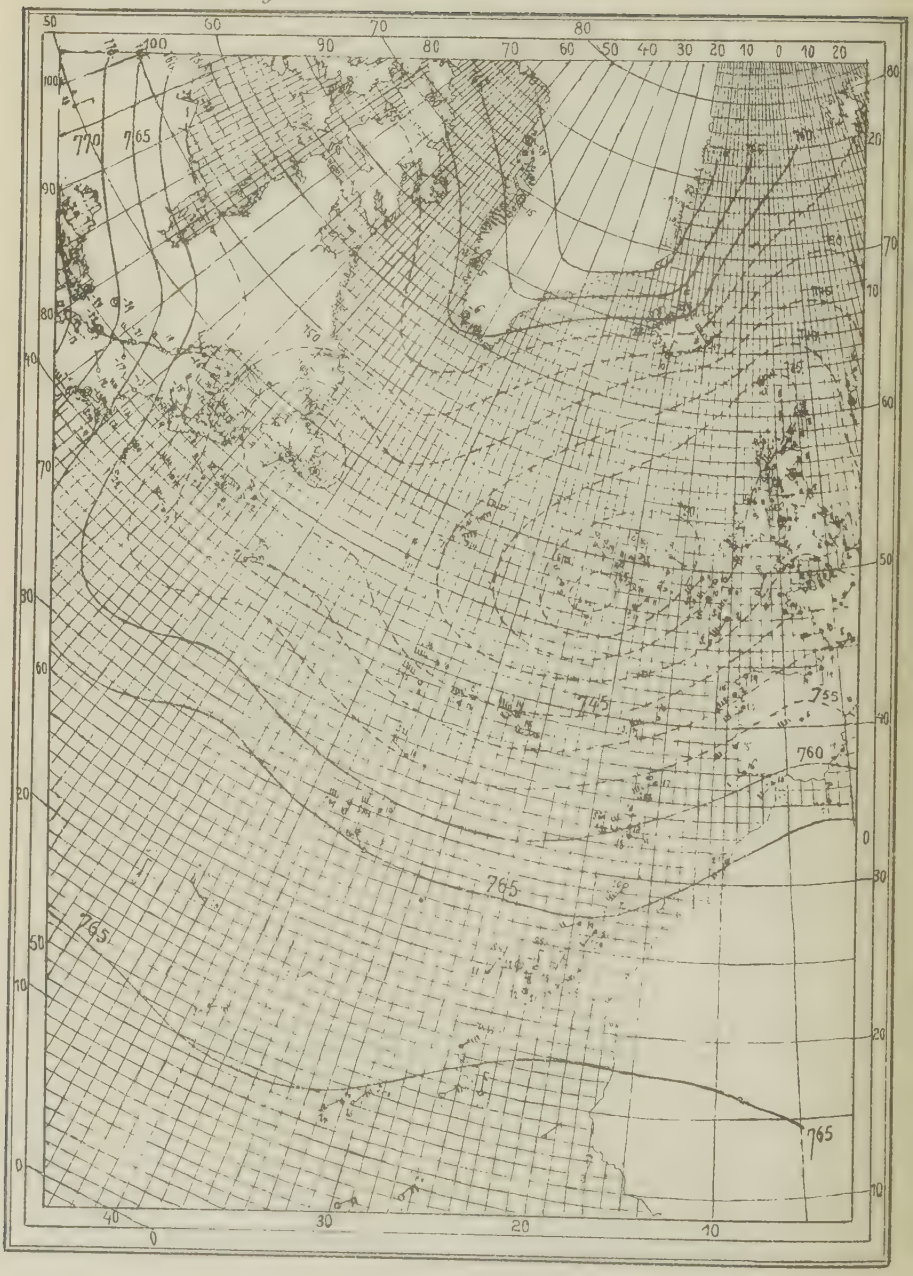


27. Oktober 1886. Morgens.

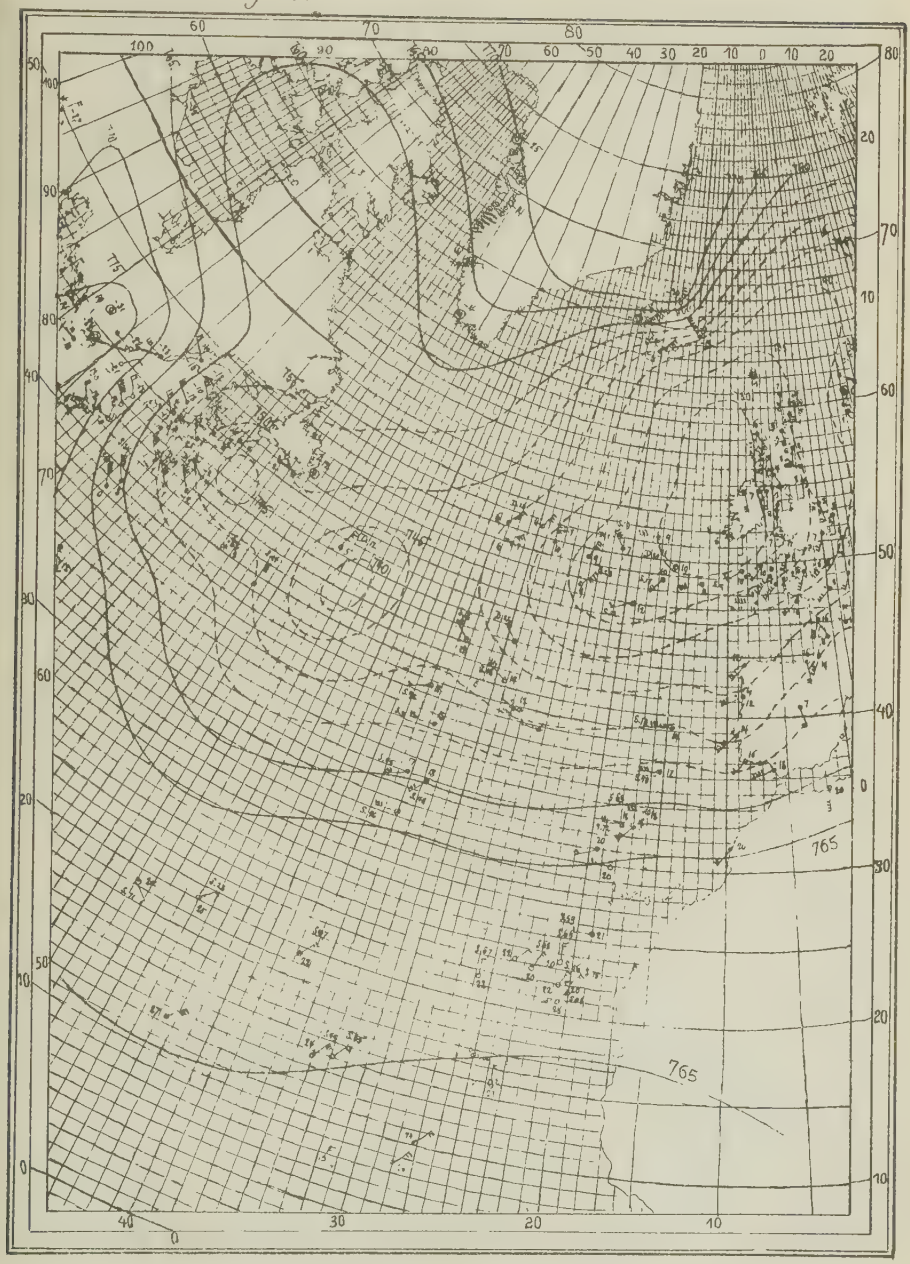


Tafel XXIII.

28. Januar 1881. Morgens.

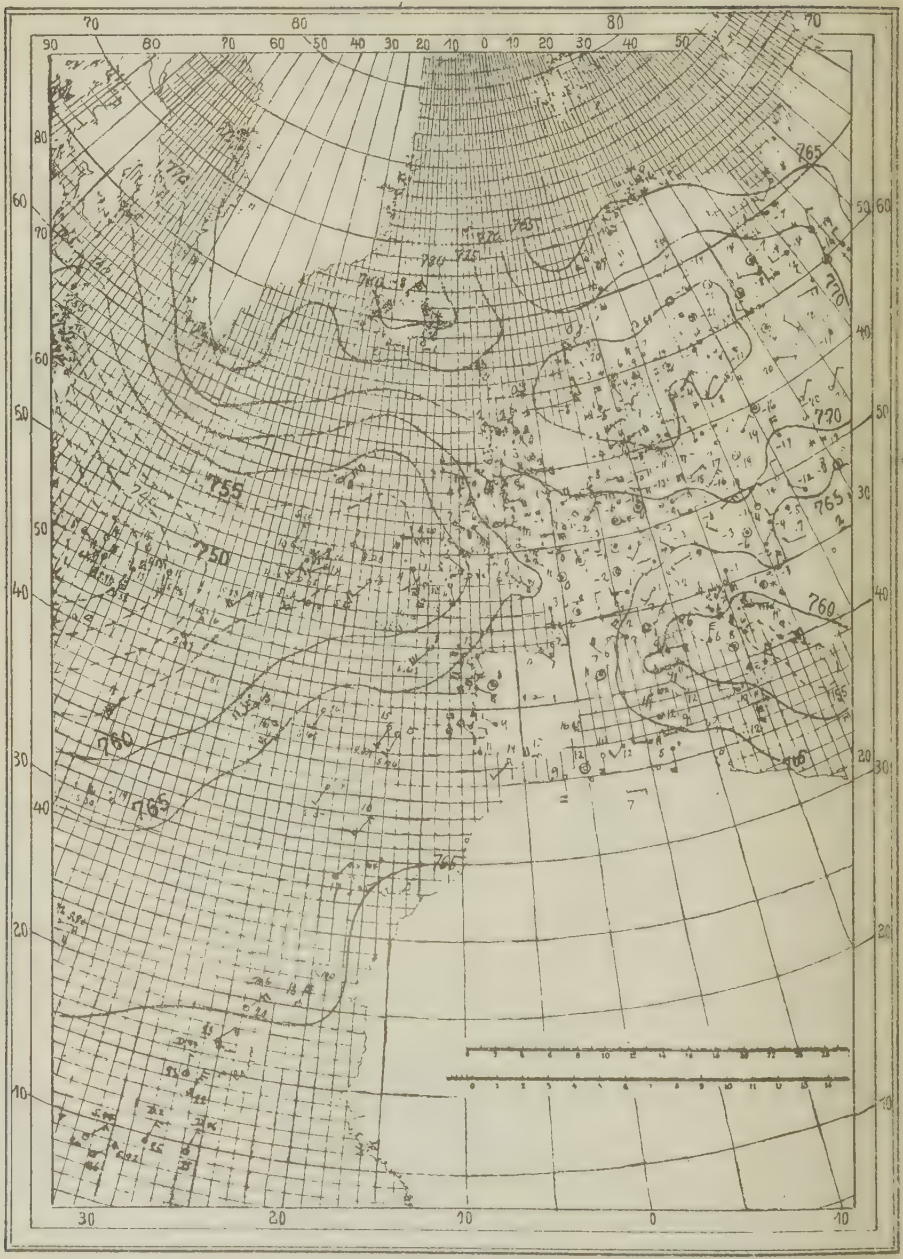


29. Januar 1881. Morgens.

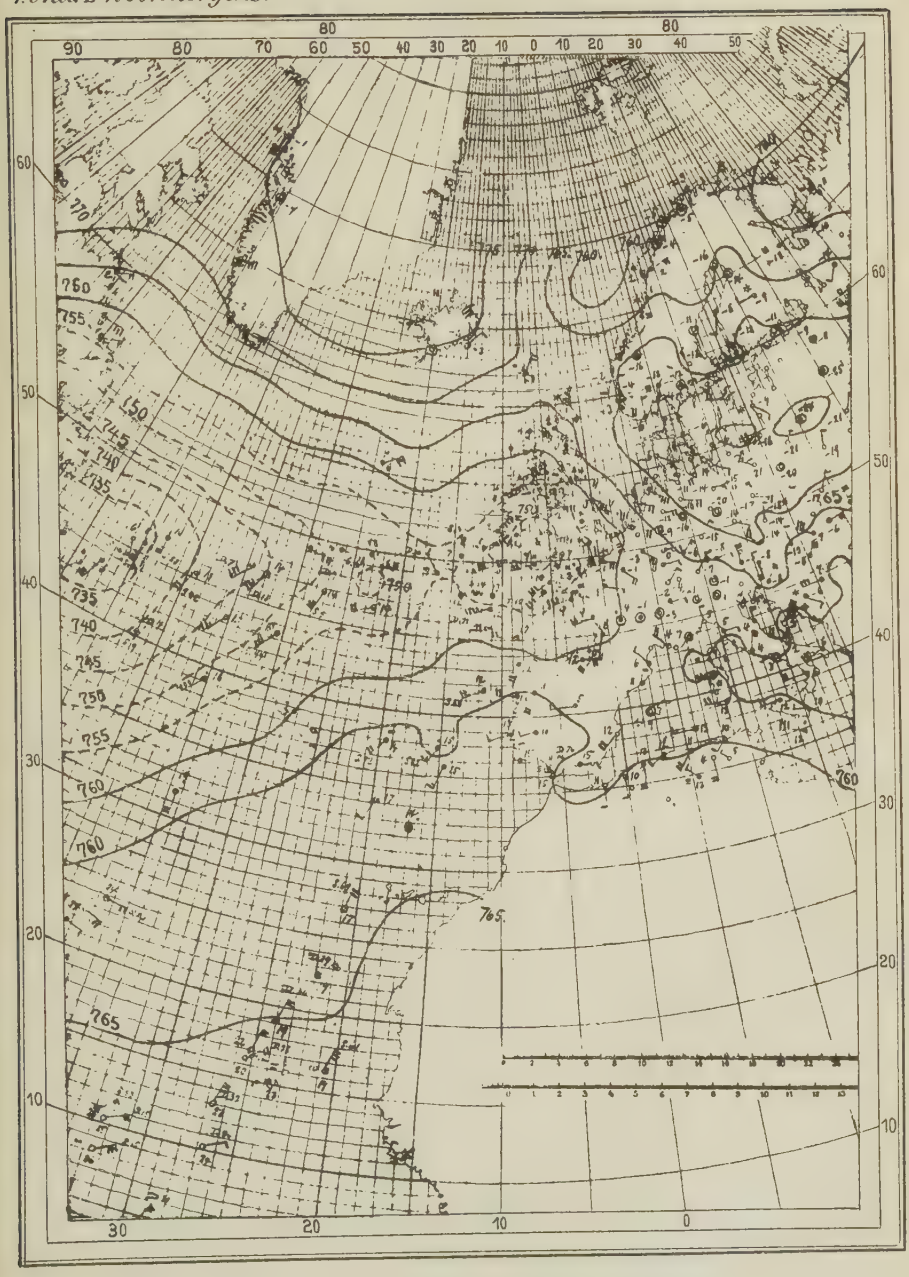


Tafel XXIV.

28. Februar 1886. Morgens.



1. März 1886. Morgens.



Druckfehlerberichtigung.

Auf Seite 67 Zeile 11 von oben lies **18.** [Januar 1884] statt 17. [Januar 1884].